音的历程

现代音乐声学导论

An Introduction of Musical Acoustics

韩宝强 著

人民音乐出版社·北京

目　录

序　言……1
章后思考与讨论题……7

第一章　听觉系统……8
第一节　听觉系统的生理构成与功能……8
第二节　骨传导在音乐中的作用……12
第三节　听觉损伤……13
第四节　听力检测……17
第五节　保护你的听觉……19
章后思考与讨论题……21

第二章　听觉系统对音高的识别……22
第一节　音高识别机制的假说……22
第二节　人耳感知音高的范围……25
第三节　主观音高与客观音高之关系……26
第四节　最小音高差的分辨……28
第五节　音乐家的音准感……29
第六节　音准感与律学研究……31
章后思考与讨论题……33

第三章　听觉系统对音强的识别……34
第一节　音强感知机理……34
第二节　外耳道共鸣与等响曲线……36
第三节　音强变化对音高感觉的影响……38
第四节　音乐的声强范围……39
第五节　音乐中的“掩蔽效应”……41
章后思考与讨论题……44

第四章　听觉系统对音色的识别……45
第一节　定义及评价体系……45

第二节 听觉系统对音色的感知机理…… 48
第三节 影响音色感的客观因素…… 51
第四节 影响音色感的主观因素…… 53
第五节 人耳在音色识别上的“特异功能” …… 56
章后思考与讨论题…… 58

第五章 音长识别、非线性及协和感问题…… 59
第一节 听觉对音长的识别…… 59
第二节 音乐时间的伸缩性…… 61
第三节 音乐听觉中的非线性现象…… 63
第四节 拍 音…… 66
第五节 与协和感有关的理论…… 68
章后思考与讨论题…… 72

第六章 音乐声的物理基础…… 73
第一节 振 动…… 73
第二节 共 振…… 75
第三节 介 质…… 77
第四节 声波与波长…… 78
第五节 声波传播的基本性质…… 79
第六节 驻波与多普勒效应…… 82
章后思考与讨论题…… 84

第七章 音乐声的基础知识…… 85
第一节 音乐声的定义…… 85
第二节 纯音与复合音…… 85
第三节 基音与泛音…… 87
第四节 泛音列与频谱…… 88
第五节 乐音与噪音…… 90
章后思考与讨论题…… 95

第八章 音乐声学测量…… 96
第一节 音乐声学测量的作用…… 96
第二节 音乐声学测量的历史…… 98
第三节 音乐声学测量项目…… 100

第四节 主观评价 …… 101
第五节 常用测量设备 …… 103
第六节 音乐声学测量需要注意的问题 …… 106
章后思考与讨论题 …… 111

第九章 乐器声学构成与乐器改良 …… 112
第一节 乐器的声学构成 …… 112
第二节 乐器的分类 …… 113
第三节 乐器改良规律 …… 117
第四节 我国民族乐器的改良简况 …… 119
第五节 民族乐器改良中存在的问题 …… 122
章后思考与讨论题 …… 125

第十章 管乐器声学特征 …… 126
第一节 管乐器发音原理概述 …… 126
第二节 管口校正 …… 128
第三节 边棱音管乐器 …… 130
第四节 簧管乐器 …… 132
第五节 唇管乐器 …… 135
第六节 几种常见管乐器的频谱特征 …… 139
章后思考与讨论题 …… 143

第十一章 弦乐器声学特征 …… 144
第一节 弦乐器发音原理概述 …… 144
第二节 弦振动的一般特性 …… 145
第三节 擦弦乐器 …… 149
第四节 拨弦乐器 …… 153
第五节 击弦乐器 …… 156
章后思考与讨论题 …… 159

第十二章 打击乐器声学特征 …… 160
第一节 打击乐器发音原理概述 …… 160
第二节 膜体打击乐器 …… 162
第三节 棒体打击乐器 …… 164
第四节 板体打击乐器 …… 167

第五节 类板体打击乐器……170
第六节 双音钟音乐性能之检测……174
章后思考与讨论题……178

第十三章 电乐器声学特征……179
第一节 电乐器发展概述……179
第二节 电乐器发声原理概述……182
第三节 MIDI 与 MIDI 乐器 ……185
第四节 MIDI 接口与信息解释 ……193
第五节 家庭 MIDI 音乐制作系统……201
章后思考与讨论题……204

第十四章 歌唱声学研究……205
第一节 嗓音构造概述……205
第二节 歌唱发声特性……209
第三节 “歌手共振峰”理论 ……212
第四节 歌唱方法……215
第五节 中西唱法的声音特征……220
章后思考与讨论题……228

第十五章 空间音乐声学……229
第一节 空间音乐声学研究的问题……229
第二节 空间音乐声学的基本概念……231
第三节 音乐环境的隔声与隔振……234
第四节 音乐与空间环境的匹配……237
第五节 小型音乐制作室……239
第六节 人工音效与杜比环绕声系统……241
章后思考与讨论题……246

附 录……247
常用乐器频率范围一览表……247
常用乐器的峰值声压级与动态范围一览表……250
噪音的种类……253
男中音不同声区正确发声共振峰数据 ……255

参考文献……256
再版后记……257

序　言

这是一本探讨音乐的底层——有关“音”的科学的书。

“音”是无形之物，它构成了音乐的主体。那么音从何而来？它具有哪些特性？它依托何种物质而存在？它又如何以“乐”的形式来打动人心？探寻这些问题的答案，即是写作本书的基本动机。

一、回到亥姆霍兹“音的感觉”

用实证手段研究音乐音响问题肇自19世纪的欧洲。在1863年的德国，当时著名的生理学兼物理学家亥姆霍兹（H.von Helmholtz，1821~1894）出版了一本名为《论音的感觉－音乐心理学基础》的学术专著，从生理解剖和听觉实验角度阐述人耳对乐音的感受。因为这是有史以来第一本从实证科学的角度探讨“音”的发生机理与性质的专著，所以对当时的欧洲音乐理论界，特别是和声学及音乐美学的研究产生了极大影响。

亥姆霍兹的理论是建立在德国物理学家兼哲学家费希纳（G.Fechner，1801~1887）所奠定的心理物理学[1]研究方法基础之上的，施通普夫（C.Stumpf，1848~1936）和里曼（H.Riemann，1849~1919）是亥氏理论的重要的继承和发展者，但二者后来的发展方向略有差异：前者以实证主义观念全身心地投入到对乐音和音乐感觉的研究之中，按照物理学模式，严格地从计量学角度，研究单个乐音和音程的听觉感受，并将其与其它乐音和音程进行比较。由于施通普夫专注于单个乐音和音程的研究，很少涉及实际音乐作品，仅就这一点来说，他与亥姆霍兹的研究颇为相近。然而这并不意味着施通普夫远离音乐实践，恰恰相反，正是他与霍恩博斯特尔（E.M.Hornbostel，1877~1935）等人合作建立了著名的柏林音响资料馆，并专注于东南亚、太平洋各国和美洲印第安人音乐研究，因而被公认为民族音乐学的前身——比较音乐学的奠基人之一。

图(序)1　著名生理学兼物理学家亥姆霍兹（H.von Helmholtz，1821~1894）

[1]　心理物理学（psychophysics）是心理学的一个分支，研究对象是人的感觉量与产生感觉的刺激量之间的关系。费希纳为学科奠基人，其所确立的精确的心理实验方法依然为今日实验心理学所采用。

里曼也是以亥姆霍兹的工作模式为其研究的出发点，完成了他的博士论文《论音乐的听赏》[1]。里曼不满足于对单个乐音和音程的听觉研究，而是将其与音乐实践密切联系在一起。他的颇具影响力的“功能和声体系”，在很大程度上就是基于音响心理学相关法则的基础之上。后人叹服于其理论体系的严密性和实证性，在“功能和声体系”诞生之日起，将其奉为音乐创作和教学的经典理论而广为传播。中国音乐界较为熟悉的功能和声理论著作，如斯波索宾、该丘斯和勋伯格等，基本上也是继承了里曼理论的内核。从这个意义上说，里曼可以算作将亥姆霍兹的理论应用于解释和构建欧洲音乐体系的最伟大的人物之一，同时也是对中国音乐理论界有着间接重要影响的理论家之一。

如果把自亥姆霍兹创立的音响心理学作为解释音乐音响问题的起点，经过施通普夫到了里曼这里，关于音乐音响的研究似乎已经接近终点，因为音乐中的一切音响问题似乎都可以得到科学的解释。随着“民族音乐学”（Ethnomusicology）的兴起以及全球性的对“欧洲音乐文化中心论”的否定，音乐学界开始在考虑一个新的问题：里曼心目中的音乐实践，完全以欧洲古典音乐为中心，在他的音乐逻辑中，主音三和弦是分析一切旋律音程的基础，由此也给他的理论体系带来致命的缺憾：对于欧洲古典音乐以外的音乐体系，如阿拉伯、印度、印度尼西亚爪哇岛等音乐体系，甚至包括欧洲晚期浪漫派的音乐和中国的民间音乐，如果运用里曼的理论体系加以分析，往往不能切中要害，有时甚至根本无用武之地。在这种情况下，人们自然要问：里曼的理论体系对非欧洲古典音乐的分析还有没有指导意义？

我国一些作曲家和研究作曲技术理论的学者很早就从音乐实践角度，或更确切地讲，是从音乐音响的感知角度意识到这一问题的存在，并试图从符合中华民族音乐传统听觉审美的角度解决这一问题，其中所采用的主要技术手段之一，就是引进非三度叠置和声结构的因素，但人们由于信服里曼理论体系的严密性和实证性，虽然对“主音三和弦决定论”有所保留，对“功能和声体系”的合理性却似乎不产生任何怀疑。今天在我国音乐院校的乐理教科书和技术理论教材中所反映出的、浓厚的里曼音乐理论体系色彩，就证实了这一点。

按常理，当人们在行进中感觉应该到达终点，却没有发现终点的任何踪迹的时候，首先考虑的问题就是：方向有没有走错？当我们跟随里曼的思维，沿着欧洲古典音乐之路走进民族音乐学那广袤的原野，突然感到我们平时所熟知的理论体系竟然无法解释欧洲以外的、多姿多彩的民间音乐现象时，头脑里自然也会闪现出这样的疑问：里曼的音乐理论体系，特别是其“功能和声体系”，能够把我们引领到解决民族音乐学技术分析的“终点”吗？如果不能，我们又当做何选择？

---

[1] 该论文后以《音乐的逻辑——从生理学和心理学的角度论证我们的音体系概论》出版。见贝塞勒：《近代音乐听赏问题》，收于《西方音乐社会学现状》金经言译，人民音乐出版社 2002 年版，第 2 页。

记得在大学上和声课的时候，授课老师曾经把里曼的《和声学》比喻为和声理论中的“面包”，意在强调该理论的经典性。对于以西方传统作曲技术理论为专业的人来说，这句话可谓千真万确，但如果走出欧洲古典音乐这个范围，教授的名言显然就带有很强的局限性：虽然还是“面包”，但却是一块仅能解决欧洲古典音乐“饥饿感”的“面包”而已。毋庸置疑，里曼音乐理论体系的局限性并非里曼的错误，更不能因此而抹煞其“功能和声体系”的严密性和实证性。这就好像我们想用望远镜观察火星，却把方向对准了木星，责任当然不在望远镜而在于我们自己。

里曼在亥姆霍兹音响心理学的基础上创建的理论金字塔，保证了欧洲古典音乐分析理论体系历数百年而不衰，这也给后人一个鲜明的启示：我们能否也在现代音响科学理论的基础上去发现适用于解释其它音乐体系的法则呢？答案应当是肯定的，但难度也是巨大的。因为，从亥姆霍兹理论到欧洲古典音乐体系毕竟只是一条不太长的路，而要想对全世界所有音乐体系给予合理的解释，则需要更多的“里曼”做出不懈的探索。这是人类与生俱来的求知欲使然，也是每个音乐学研究者应当承担的责任。

当我们尝试为欧洲以外的音乐构建新的理论解释体系的时候，应当尽可能采纳和包容前人已有的、被证明是科学或合理的研究成果。具体到民族音乐学研究，笔者认为，里曼“音乐的逻辑”虽不能用来解释欧洲以外其他民族的音乐，但其理论体系中体现出来的、重视人的音乐音响感知机理的科学态度，是永远值得提倡和借鉴的。此外，我们还应重视与里曼体系并行发展起来的另一种研究模式，虽然作为一种理论体系，其逻辑架构和表述内容还不够清晰和完整，但对于今天民族音乐学研究却有着奠基性的意义。这就是由施通普夫、霍恩博斯特尔和埃利斯[1]（A.J.Ellis，1814~1890）等人奠定的、笔者名之为“实证民族音乐学”的研究模式。其主要特征，就是重视利用实验手段，在对各民族的音乐音响进行测量和比较分析的基础上，研究不同音乐体系的形态、规律。这种模式对我国民族音乐学研究也产生了一定影响。

无论是里曼的欧洲古典音乐分析体系还是施通普夫等人的“实证民族音乐学”研究模式，当我们追寻他们的理论根基时，最后都将归结到亥姆霍兹“音的感觉”。这种结果提示我们：世界所有的音乐体系，无论其形态、风格和音响特点有多么大的差异，但有一点是不可逾越的，那就是人耳对音的感觉，这是所有音乐体系的底层基础。

由此便引出了笔者在本节标题中所呈示的命题——理论的回归：从一种较高层面、为我们所熟知的理论体系回归到诞生这种体系的基础层面。此举看似使理论研究更远离音乐，但实际效果却能让我们更深入、更清晰地去认识全世界所有的音乐。

---

[1] 埃利斯（A.J. Ellis）：英国音乐声学专家，音分值的创用者，比较音乐学奠基人之一，曾著有《各民族的音阶》。

二、“音”是什么?

回到亥姆霍兹“音的感觉”,首先碰到的问题是:“音”是什么?翻开国内常见的乐理教科书,一般都将声音定义为“物体振动的结果”。如果追溯其来源,可能皆出自苏联著名音乐教育家斯波索宾的《音乐基本理论》[1]。表面上看,这个定义准确无误且又很好证实:我们敲一下鼓,用手轻抚鼓面,就可以感觉到鼓面的振动,与此同时我们也听到了鼓声。我们拨一下琴弦,也会有同样的感受。由此,我们很容易认同“音是振动的结果”这一观点。

然而我国古人却把声音与听觉和大脑联系在一起:

凡音之起,由人心生也。人心之动,物使之然也。感于物而动,故形于声;声相应,故生变;变成方,谓之音。[2]

再看中国最早的文字——甲骨文中的“声”字,其字形像一只耳朵在听编磬的演奏[3],见图(序)2。繁体字的“聲”,里面也还保留着一只“耳朵”。甲骨文的“音”的字形像说话的舌头,先作“言”讲,后演化为音[4]。这说明,在我们先民的概念中,“声”和“音”是与“听觉”和“大脑”(语言是受大脑支配的)联系在一起的。

聲 言

图(序)2

在英文音乐词典中,与“声”和“音”相对的单词是“Sound”和“Tone”,仔细研究其释意,可以说与我国儒家理论大致相当[5]。查阅其它音乐声学文献,内容也基本相似。如著名音乐声学专家罗兴[6](Thomas D.Rossing)在其《声音科学》(*The Science of Sound*)一书的序言中,开宗明义把声音归结为两方面因素使然:一是人耳的听觉感知,二是对听感产生作用的、存在于某种媒介中的扰动,二者缺一不可。他还用一个古老的欧洲哲学谜语来说明其观点:“森林里倒了一棵大树,却没有人听见,这算不算有声音?”[7]

现在让我们对声音现象的发生作一个简要描述。

就一般情况而言,声音源于物体的振动,又称振源。譬如,弦是弦乐器的振源,空气柱是

---

[1] 斯波索宾:《音乐基本乐理》,汪启璋译,人民音乐出版社 1982 年版,第 1 页。

[2] 《史记乐书第二》,中华书局 1999 年版,第 1039 页。

[3] 《甲骨文字典》,四川辞书出版社 1989 年版,第 1289 页。

[4] 徐中舒:《怎样考释古文字》,载《出土文献研究》,文物出版社 1985 年版,第 215 页。

[5] 有关“Sound”和“Tone”的释义可参见(1)S. Sadie 主编《新格罗夫音乐与音乐家词典》(*New Grove Dictionary of Music and Musicians*,伦敦麦克米兰出版社,1980)相关词条:Acoustics(Vol.1 p.43),Sound(Vol.17 p.545),Tone(Vol.19 p.59)。(2)W.Apel 主编《哈佛音乐词典》(*Harvard Dictionary of Music* 增补版,美国哈佛大学出版社,1979)相关词条:Acoustics(p.8),Tone(p.856)。

[6] 罗兴:曾任美国北伊利诺伊州立大学物理系教授,美国音乐声学学会会长。

[7] Thomas D.Rossing. *The Science of Sound America*. Addision-Wesley, 1982:3.

管乐器的振源，电子振荡器是电子乐器的振源等。振动需要通过一定的介质才能传播，振动在介质中的存在称为“波”（Wave）。就音乐而言，空气是最常用的介质。然而有了振源和波并不等于就会有声音。譬如，我们的周围存在着大量传输各种信息的电磁波（包括光波），但由于振动形式和振动频率已超出我们听觉的感知范围，因此我们虽身陷“波海”却依然能安然入睡。

综上可以说明，只有当某一类声波被听觉系统接收和分析后，转换为生物电信号并刺激大脑中控制声音的相应部分，人们才会有“声音”的感觉。由此，我们现在对“声音”重新做一个比较完整的诠释：

声音是人类听觉系统对一定频率范围内振波的感受。

在这个定义中，听觉感受是声音存在的主体，振波是声音存在的客观条件，二者缺一都不能产生“声音”。

这一过程可用图（序）3来表示：

图（序）3

上图中，如果把“鼓”（振源）视为“音”的起点，把大脑的听觉中枢视为“音”的终点，那么从振源经介质到大脑就构成了一条“音链”，所有声音信息，包括音乐都是经由这一通道传到我们的心灵。

本书冠以**“音的历程”**，即指“音”从通道的此端至彼端、从客观到主观的过程。在这个过程中，包含着振源、介质和听觉系统三个方面的因素，其中任何一个因素发生变化，都会对“音”的感觉产生直接影响。

三个因素中如果缺少了一个因素，那情况又会怎样呢？

首先可以肯定，如果失去“听觉系统”这个因素，“音”则不复存在。注意，这里说的是“音”，不是声波。正常人与失聪者最大区别就在于，后者失去了健全的听觉系统，因此尽管周围遍布声波，但他们却“充耳不闻”。

如果失去振源和介质这两个因素，从物理学和生理学的角度来说，人们也无法感知“音”的存在，因为没有声波或其它波（固体波或液体波）的刺激，听觉系统就不会产生“音的感觉”，但是从心理学角度讲，对具有较高音乐修养的人来说，在没有振源和介质这两个因素的条件

下，依然可以有声音的感觉，这就是我们常说的“内心听觉”。这种能力往往是一些专业音乐工作者的基本功，例如作曲家在进行交响乐创作时，作品的音响其实已经在其脑海中跌宕起伏；指挥家在指挥一个新作品时，要凭借内心听觉事先把握住作品的总体音响效果，才能保证在乐队面前指挥若定。一流的演奏家也常利用内心听觉来提高演奏水平，完善演出效果。有些人甚至可以在周围寂静无声的时候利用自己的内心听觉来欣赏音乐作品[1]。

内心音乐听觉属于一种特殊的听觉记忆，普通人难于拥有，但它可以说明一个问题，即大脑听觉神经对声音的存在是具有决定性意义的。任何弦管鸣奏只有进入了听觉，被我们的大脑所感受和识别，才变为有意义的音乐之声。

正因为听觉系统在“音的历程”中占有如此重要的地位，所以本书把音乐听觉问题放在全书之首，这或许是与其它音乐声学著作最大的不同之处。

三、阅读本书的方法

全书在总体内容上分为三大部分，依次为：**音的感觉**（第一至第五章），主要介绍有关乐音感知方面的问题；**音的传播**（第六至第八章），主要介绍有关音的物理问题；**音的色彩**（第九至第十五章），主要介绍乐器声学和空间音乐声学方面的问题。每个部分的知识相对独立，读者可以根据自己的需要，直接浏览相关章节的内容而不必从头开始阅读。

本书在写作时考虑的读者定位主要包括：专业音乐工作者、音乐院校的师生、乐器制造者、音乐声学工作者、音响工程师、录音师和音乐爱好者。囿于笔者走过的专业道路（少年学习小提琴，大学本科学习作曲、研究生转入民族音乐学、律学，后一直从事有关音乐形态学、音乐声学和计算机辅助音乐学研究），本书在材料来源、知识结构、内容深度、实例引用和语言表述的习惯上难免带有自己专业的“烙印”。譬如，本书对有关物理声学基础的内容讲得不很详细，并非这方面知识不重要，而是出于两方面考虑：一是本人非物理声学专业出身，不敢也不愿全部照抄他人的理论；二是考虑到大部分读者的知识背景，对模拟复杂声场环境和振动模式的数学方程式在理解上可能有一定困难。如果读者需要这方面知识，可以根据本书提供的参考文献去查寻更权威、更详尽的解释。

[1] 缪天瑞：《音乐内心听觉在创作和演奏中的作用及训练问题》，《交响》，2000 年第 2 期。

章后思考与讨论题

1. 在对“音”的认识上，中西方之间有何异同？

2. 音乐声学研究需要听觉的参与吗？

3. 亥姆霍兹在音乐声学方面的研究成果对后世音乐理论和实践产生了哪些直接和间接的影响？

4. 音乐声学与音乐学和作曲技术理论之间有何联系？

5. 音乐声学与基本乐理有何关联？

第一章　听觉系统

第一节　听觉系统的生理构成与功能

人类的听觉系统是我们得以接收外界声音的重要器官。概括讲，听觉系统是由外耳、中耳、内耳和脑听觉神经组织构成（见图1-1）。

一、外耳

外耳包括我们肉眼可见到的耳廓和外耳道。耳廓表面凹凸不平，耳垂为脂肪所构成，其余由弹性软骨组成。外耳道是稍弯曲的管道，起自外耳，止于鼓膜，全长约24毫米。外1/3为软骨部，内2/3为骨部。外耳道覆以皮肤，内有毛囊和耵聍腺。

外耳在听音过程中主要起到三种作用：一是耳廓可以将声场中的声波进行聚焦并传导至中耳。二是利用耳廓对声源进行定位。三是利用耳道对声波信号进行共鸣放大。

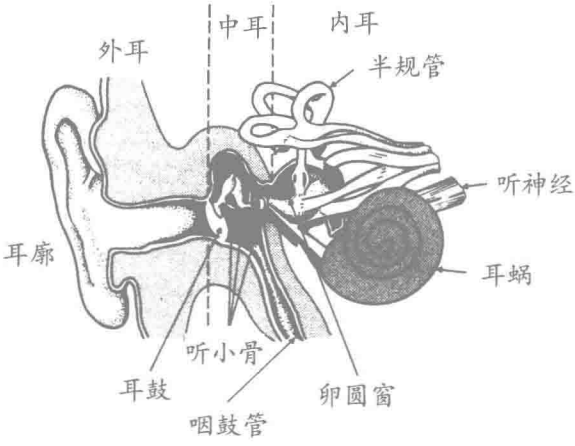


图 1-1　耳朵构造示意图
中耳和内耳已作局部放大

耳廓的聚焦作用是众所周知的，当我们听远处的声音时，常常把手放在耳后，这样做就起到了增加聚焦面积的作用，由此可以拾取到更多的声波信号，使声音听起来更清楚。从这个意义上讲，人的耳廓越大越有利于声波信号的拾取。一些动物，如兔子、狗、驴的耳廓相对于它们的身体来说都比较大，所以它们的听觉比人类要灵敏。

耳廓的定位功能是近年来人们关注的一个研究课题。按传统的理论，只有两个耳朵同时接收声波信号，人们才能对声源进行定位。但新的研究结果表明，即使一只耳朵，人类也可以利用耳廓、身体其它部位（如脑袋和肩部）和环境物的反射作用，对声源进行定位。当然，单耳定位终究不如双耳定位来得精确。

从声学角度讲，外耳道可视为一个共鸣管，将外来的声波加以共鸣、放大。但由于每人的

耳道都有各自的生理特征，形状和大小各不相同，因此理论上讲，每个人耳道的共鸣放大作用也不相同。有关耳道的放大功能将在第三章继续讨论。

二、中耳

中耳包括鼓膜、鼓室及听小骨、咽鼓管等。鼓膜位于外耳道底部，呈扁锥形，尖朝内，灰白色，有光泽，直径约为9毫米。分为三层：内层为中耳粘膜层；外层为复层鳞状上皮，与外耳道皮肤相延续；中层为放射状和环状纤维组织。鼓膜的血管及神经丰富，痛觉灵敏。

鼓室位于鼓膜与内耳外壁之间，是一个含气的空腔，内有听小骨。鼓室可分为鼓室本部及鼓室上隐窝两部分。鼓室的外壁大部分是鼓膜，内壁为内耳迷路的外侧面，上壁、下壁均借一薄骨板分别与颅中窝及颈静脉球分隔。

听小骨包括锤骨、砧骨和镫骨（参见图1-2a），三者相连成听骨链。锤骨柄紧接鼓膜紧张部上缘，砧骨居中，有关节与砧骨和镫骨相连，镫骨底板与内耳卵圆窗相接。

咽鼓管从鼓室前壁向前、内、下方通向鼻咽侧壁。咽鼓管的咽口一般呈闭合状态，吞咽时管口顿开，使空气进入鼓室以保持鼓膜内外气压平衡。

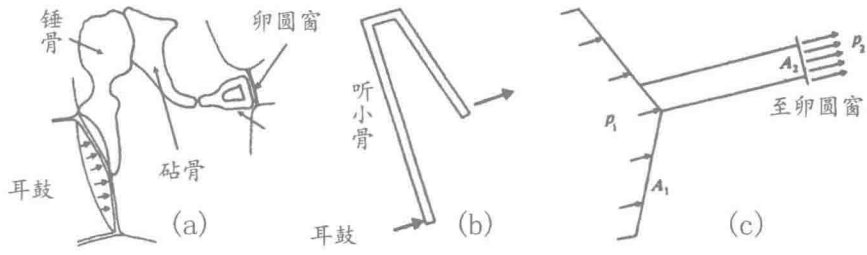


图 1-2　听小骨将声波放大示意图

说明：(a)声波通过耳鼓经听小骨传递到卵圆窗

(b)听小骨杠杆工作原理示意图

(c)耳鼓与卵圆窗之间压强变化示意图

中耳在听音过程中所起到的作用，是将声波放大并传导至内耳。放大声波的工作主要由听小骨来完成。其放大原理如图1-2所示：由于听小骨中锤骨的长度长于镫骨，当锤骨受到鼓膜的推力时，根据杠杆工作原理，在镫骨上产生的力必然大于锤骨所受到的力；根据压强变化原理，在强度不变的情况下，受压面积越小，其所受到的压强就越大。由于耳鼓膜的面积大于卵圆窗的面积，根据上述原理，卵圆窗所受到的压强自然比耳鼓膜处更大。

正是上述两种结构力的作用，使鼓膜接收到的声波压力在听小骨传导的过程中得到放大。

三、内耳

内耳由前庭、半规管、耳蜗和连接耳蜗与大脑的神经束四部分组成。

前庭位于内耳中部，呈椭圆形，前为耳蜗，后接半规管。前庭外侧壁是鼓室内侧壁的一部分，有卵圆窗及圆窗。卵圆窗是与听小骨衔接的地方，由于内、外淋巴在压力变化时体积不变，圆窗在这里便起重要的缓冲作用：当镫骨及卵圆窗膜向内推时，它向外鼓出；当镫骨及卵圆窗膜向外拉时，它向内收。

半规管有三个互成直角的骨管，根据其所在位置分为上、后、外半规管。

耳蜗因形似蜗牛壳而得名，为旋转两圈半的螺旋状骨管。耳蜗中央有疏松骨质的蜗轴，有薄骨片由蜗轴伸入螺旋管内腔，由耳蜗底部盘旋上升，直达蜗顶，称骨螺旋板。从骨螺旋板外缘到耳蜗外壁有基底膜连结，于基底膜上方骨螺旋板外缘又斜伸出一薄膜，称前庭膜。这样，耳蜗便被基底膜和前庭膜分隔成前庭阶、鼓阶和蜗管（参见图1-3）。

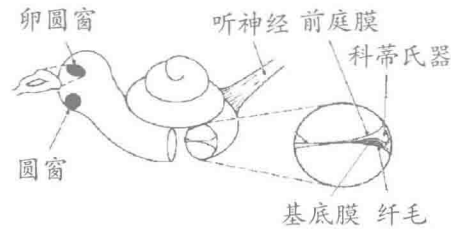


图 1-3 耳蜗横剖面示意图

蜗管内储内淋巴液，为一封闭的盲管。前庭阶和鼓阶都含外淋巴液，并在蜗顶借蜗孔相通。内耳中各种神经末梢感受器的形式不同，而组织结构却相仿，皆由一种支持细胞和神经上皮的毛细胞组成。耳蜗神经的末梢感受器称为“螺旋器”，又称“科蒂氏器”（Corti's organ），位于蜗管基底膜上。

在电子显微镜检查中发现，基底膜上每一毛细胞下面有两种神经末梢。分别与两种神经束衔接，一种称“传入神经束”，即把耳蜗中产生的声音信号传入脑干耳蜗核。另一种称“传出神经束”，同毛细胞和传入神经束末梢略有接触，这一神经束来自脑干的拉斯默森（Rasmussen）氏橄榄形耳蜗束。传出神经束的主要作用是对耳蜗功能起抑制性影响。

内耳在听音过程中所起的作用，主要有两点：一是对声波信号进行初级分析；二是将声波信号转换成生物电信号，传导至大脑。

内耳对声波的分析主要在耳蜗中完成。由于耳蜗的构造十分精密狭小，故对于耳蜗分析功能的研究工作直到19世纪才开始展开。最早的研究是探讨耳蜗对音高的识别，主持此项研究工作的是德国生理学家兼物理学家亥姆霍兹。他根据死亡者耳部解剖的结果，认为耳蜗中的基底膜相当于一个音高分析器，通过基底膜上大量长短不一的纤毛与相应的振动频率产生共振来分析音高。其中，短的纤毛与高频产生共振，长的纤毛与低频产生共振。这种假说被后人称为“竖琴说”（The Harp Theory）[1]。后人通过更为精细的研究，发现人类耳蜗内的纤毛

[1] H.von Helmholtz. *On the Sensation of tone, As a Physiological Basis for the Theory of Music*, 4th ed. Edited by A. J. Ellis. New York: Dover, 1954.

数量大大超过了人耳所能感觉到的频率赫兹数，遂又有人提出新的音高识别理论。第二章对此还作进一步阐述。

从人们对耳蜗分析功能的研究情况来看，焦点一般定位在音高分析上，而对于乐音四要素中的其它三要素——音强、音色和音长的研究，相对来说比较薄弱。

除分析功能外，耳蜗还担负着换能工作：将机械能转换为生物电能。目前一般认为耳蜗中的毛细胞是完成机械能转换成电能的转换器，毛细胞顶端的表皮相当一个可变电阻，当耳蜗受到声音刺激时，毛细胞会发生弯曲，从而使耳蜗内淋巴液和毛细胞之间产生电位差。不同方向的弯曲产生不同的电位差，这种电位差产生的生物电流通过神经束传导至大脑，从而向大脑“通报”声波的讯息。

四、脑听觉神经组织

大脑的听觉神经是产生声音感觉的地方。根据前人研究，大脑不同位置与相关功能大致可分为：额叶，即大脑半球的前部，主要掌管功能为运动、言语、智能、情感等；顶叶，即大脑半球的后顶部，主要掌管功能为感觉、阅读等；颞叶，即大脑半球的外侧，主要掌管功能为听觉、空间位置等；枕叶，即大脑半球的后部，主要掌管功能为视觉、阅读等（参见图1-4）。

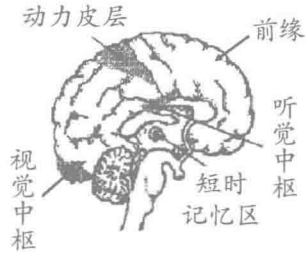


图 1-4　大脑生理功能分区示意图

按照传统理论，如果直接刺激大脑皮层某一区域，机体就会出现相应的反应；如果大脑皮层局部受到损伤，机体相应的活动就会发生障碍。例如，当病人进行脑手术时，刺激颞叶的听区，病人就会听到音响甚至音乐；脑损伤的病人，如外伤或肿瘤，如果颞叶受损，病人就会发生感觉性失语，听不懂别人的讲话。由于大脑皮层神经细胞交织分布和复杂联系的缘故，加上代偿功能的形成，因而各个区域之间的功能会建立一定的联系，在某一区域损伤一段时间之后，相应的功能可能得到部分恢复。

耳蜗神经与大脑中枢的联系、与大脑皮层听觉通路模式的联系，以及与大脑皮层听力功能工作机理的联系比较复杂，并非像有的理论所述“不同半脑主管不同性质的思维”[1]那么简单，有些迄今为止尚未确定。目前在生理学上较为一致的看法是：耳蜗神经和前庭神经各有独自的神经核与大脑中枢联系。脑干内有一个听觉蜗核，来自耳蜗的神经一支经小脑下脚前部进入前蜗核，另一支经它的外侧进入小脑下角的后部或后蜗核。现已发现，来自耳蜗基底

[1]　典型的理论是“左脑掌管逻辑思维，右脑掌管形象思维”。由此在音乐教育中也形成一种观念：学习一种乐器会有助于右脑（形象思维）的开发。

膜的神经束进入后蜗核的后部，来自蜗尖的神经束进入后蜗核的前部[1]。经耳蜗进行过初级分析的所有声波讯息最终在蜗核进行最后处理，并通知大脑的感觉神经："我接收到了声音"。

出于人道和伦理方面的考虑，上述有关脑听觉神经组织的生理解剖结果，大部分出自非人类的哺乳动物，至于人类大脑识别声波信号的生理过程，目前尚未有清晰而完整的解释。这方面的进展或许还有待于更先进的实验手段和更富于创意的实验理论的出现。

第二节 骨传导在音乐中的作用

声音除了上述传导方式之外，还有两种次要的传导方式。一种是鼓膜振动造成鼓室内的空气振动，然后直接波及卵圆窗而达内耳，这种方式对声能的传导影响极小；另一种方式是振波直接作用于颅骨和耳蜗骨壁而传及内耳，即形成所谓"骨传导"，简称"骨导"。

大家对于骨传导并不陌生。我们每天都在通过骨传导感受自己说话的声音，只不过骨传导和外部传导的声波总是混杂在一起，所以我们无法单独听到通过骨传导传来的声音效果。但是你可以比较一下有骨传导和没有骨传导的声音效果：用一台比较好的录音机把你的讲话或歌唱录制下来，然后再听，你会发现你自己的声音变了。其实，这才是平时大家听到的你的"真声"——没有骨传导成份的声音，而你平时所熟悉的自己的声音是带有骨传导的声音。换言之，任何人所听到的自己的声音都是唯一的，绝无第二个人与你有相同的声音感受。

在声乐教学中，一个很重要的问题就是如何教会学生辨识骨传导的"误导"。由于骨传导作用，学生可能感觉自己的声音已经很好听，但老师和其他人并不认可，因而对自己的感觉产生怀疑。如果懂得了骨传导的原理，不妨利用录音机，在老师的帮助下对两种声音进行大量的比较，从中找到一些规律，逐渐在大脑中建立起一种对应机制，久而久之就能够比较"客观"地感受自己的声音了。声乐教师在教学过程中，也要随时注意学生所犯错误的性质是不是属于受骨传导影响，以区别于其它性质的歌唱错误。

凭借骨传导可以使脑神经没有受损的弱听人感受到声音。最熟知的例子是德国作曲家贝多芬的故事：晚年失聪的贝多芬之所以可以继续从事音乐创作，就是利用骨传导原理来感受自己的音乐。他用嘴咬住一根木棍，木棍的另一端顶在钢琴的音板上，钢琴的声音可以通过木棍和牙齿直接传导至耳蜗，从而完成声音的传递过程。但是当他指挥自己的音乐作品时，由于不能再利用骨传导的作用（因为不能用木棍顶在所有乐器上），所以他根本无法排练自己的作品；而音乐工作者都知道，指挥的价值只有在排练新作品的过程中才能体现出来，因此说贝多芬晚年对自己作品的指挥，只能说是一种"真情表演"。

---

[1] 孙玉温：《听觉比较生理学》，中国科学技术大学出版社 1994 年版，第 133 页。

大家或许都有这样的感受，在音乐厅与在扬声器前面欣赏音乐，特别是交响乐的效果是迥然不同的，其中就有骨传导的因素在起作用。因为乐队中的一些低音乐器，如定音鼓、大鼓，在演奏时听众一方面会感受到声波的振动，另一方面身体也会感受到来自音乐厅地面的振动，振动通过身体直接传导至耳蜗，也就形成了一种“骨传导”。所谓“临场感”，从声学角度讲很大成分上是听觉对声波与固体波叠加的结果。扬声器中放出的音乐是通过麦克风录制的，在录制的过程中固体传声的因素已经完全排除，也就是说，从声源上讲扬声器的音响中已经不包含可供“骨传导”发挥作用的因素，因此即使你用再好的音箱，以再大的音量来播放，也不可能产生与音乐厅一样的“临场感”。

借助身体骨传导的作用，一些失聪者可以感受他人发出的声音信息。例如在聋哑学校，学生们可以借助骨传导来感受音乐的低音节奏，从而可以排练舞蹈。聋哑学校教师为了提醒学生注意，往往采用拍桌子、跺地板的方式，不明道理者以为老师在发脾气，其实这是老师对失聪学生的一种特殊呼唤方式，即在利用骨传导引起失聪学生的注意。聋哑学校的教室，一般都采用木质地板和桌椅，目的就是要保证能有高质量的传导效果。

据说公安人员在办案时也会用到骨传导原理来识别真假聋人。例如有的罪犯为逃避法律的惩罚，佯装成聋哑人，为辨其真伪，公安人员往往会在犯罪嫌疑人的身后出其不意扔下一块重物，若犯罪嫌疑人马上有所反应，就是真聋，若没有反应，则一般可判定其为装聋，因为正常情况下，大多数聋人都会通过骨传导感受到重物落地的振波，而假冒聋人常常故意“充耳不闻”，反倒暴露其在“装聋作哑”。

当然，让骨传导发挥作用也有一个前提，就是要有一个健全的内耳（主要是耳蜗）和脑听觉神经组织。据目前医学科技的进展情况，如果内耳受损，还可以借助人工耳蜗来拾取声音信号，但对脑听觉神经组织的受损，科学家还没有任何办法可以解救。

第三节　听 觉 损 伤

对于从事音乐工作的人来说，耳朵如同画家的视力，需要百倍小心地呵护。

“听觉损伤”（Hearing loss），是听觉生理学的一个专有名词，用于衡量听觉损伤程度。美国《听觉与健康》主编、听觉专家贝克（Douglas L. Beck）认为，当出现如下情况时就可能存在某种程度的“听觉损伤”[1]：

1. 听人讲话时，在语音的理解上比较吃力。

---

[1] Douglas L.Beck: *Hearing, Hearing Loss and Hearing Aids: Issues and An-swers*.http://www.healthyhearing.com/healthyhearing（2002.07.02）.

2. 频繁要求别人重复所讲过的话。

3. 听笑话时，由于“听丢”了许多关键“包袱”而难以发笑。

4. 总抱怨别人说话不清楚。

5. 总向别人打听会议的细节。

6. 听音乐或看电视的音量总比其他人大一些。

7. 听不见门铃或电话铃声。

8. 需要注视别人的讲话口型才能更好地理解他们。

综合看，造成听觉损伤的诱因不外乎两种因素：一种是外来因素，如细菌或病毒感染，耳部遭受暴力打击，气压损伤或强烈的噪音刺激，药物或其它化学药品引起的中毒等；另一种是内在因素，如某些先天性疾病，身体衰老，供血不足等。由于致病原因不同，影响听觉器官的部位和程度也各异。

就耳疾发生的时间而言，又可分为先天性和后天性两种。先天性的是在出生前由于生理或病理原因，使得听觉器官发育不健全或遭到破坏所致，而后天性的多半是病理的原因。

要保护我们的听觉系统，首先应当知道哪些因素对听觉容易造成损伤。据专家介绍，导致后天性听觉损伤的主要因素是外耳道堵塞、中耳炎、药物中毒和强噪声刺激[1]。

一、外耳道堵塞

最常见的原因就是耵聍(即耳垢)堆积。通常情况下，耵聍会随着人的咀嚼等下颌运动而自行脱落出来，即使有一些耵聍存在也不会影响听力。需注意的是有时当人们洗头不注意或游泳后耳道内进了水，耵聍被泡开，体积膨大，就可能塞满耳道，从而引起听力减退。也有的人耵聍分泌较多，加上外耳道皮肤的脱屑和外界混入的灰尘等，形成了坚硬的块状物，外耳道堵满，医学上称“耵聍栓塞”。这种坚硬的栓塞物不但阻挡声音的传导，而且会刺激外耳道，引起疼痛。此外，外耳道内长疖子或急性炎症所致的皮肤肿胀，也可能将外耳道堵塞，引起听觉障碍，同时还伴有剧烈的疼痛。

有少数人生下来就没有外耳道，医学上叫作“先天性外耳道闭锁症”，这种病人的耳廓和外耳道可能存在不同程度的畸形，但听觉神经有可能正常。先天性外耳道闭锁有各种不同类型，如果外耳道骨部发育还正常，只是被一层皮肤等组织所封闭，称“膜性闭锁”，这种情况下中耳的发育多半是正常的，治疗时只要将皮肤形成的一层隔膜切除，外耳道即能畅通，听力可以恢复到正常水平。

---

[1] 甘智林：《耳聋的原因及诊断》，上海科学技术文献出版社 1985 年版。

二、中耳炎

在影响听力的各种病理原因中，中耳炎可能是最常见的一种疾病。中耳炎有化脓性和非化脓性之分，化脓性中耳炎，俗称“耳底子”，在我国农村中的发病率比较高。这种病会破坏鼓膜、听骨链和其它中耳结构，造成传导性听觉障碍，据报告，河南地区的中耳炎致病菌以金黄色葡萄球菌为最多，绿脓杆菌次之，变形杆菌居第三位；山东地区则以变形杆菌占第一位，其次为葡萄球菌和绿脓杆菌[1]。这三种细菌毒性、破坏力都很强。

急性中耳炎通常是由咽鼓管感染形成的。例如，在伤风感冒的时候，鼻腔粘膜发炎，活跃的细菌会从鼻咽部的咽鼓管开口直入中耳，引起中耳粘膜发炎。在儿童时期，这种情况尤为多见，因为幼儿咽鼓管既粗且宽，又直又短，呈水平方向，鼻腔和鼻咽部的细菌很容易侵入。患急性中耳炎的另一个主要原因是游泳方法不当，不洁净的泳池水经鼻咽部的咽鼓管开口进入中耳，或者灌进耳道，穿破鼓膜而致。游泳完毕用力擤鼻，也是细菌进入咽鼓管的一个重要原因。还有人喜欢使尖锐的东西挖耳朵，很容易损伤外耳道皮肤或戳破鼓膜，给细菌打开方便之门，导致发炎。

一旦得了急性中耳炎，会感觉耳内剧痛，有如脉搏跳动一样，同时听力也大受影响。一般情况下，当压力增高到一定程度时，脓液就会穿破鼓膜，由外耳道流出，随室压力减小，痛觉亦减轻，再配合药物的作用，炎症就逐渐消退。穿破的鼓膜有可能慢慢自行愈合，听力也可以全部或部分恢复，只是鼓膜穿孔会被一层疤痕组织所封闭。如果在急性期间没有得到及时治疗，或者病人体质本来就很衰弱，细菌毒性过强、数量过多，病情就会缠绵不断、经久不愈，继而转成慢性中耳炎。

听小骨中以砧骨最易受炎症侵蚀而腐烂，使骨链中断，失去传声功能。即使一时炎症停止，机体在修复过程中所形成的疤痕纤维组织也可能使听骨粘连固定，不能自由灵活振动，这种情况称为“粘连性中耳炎”。有时增生的疤痕组织中伴有钙质沉积，骨质增生，以致将听骨、卵圆窗和圆窗都紧紧包裹起来，医学上称此为“鼓室硬化症”。据说德国作曲家贝多芬当年就因患有此症而导致失聪。

三、药物中毒

抗菌素是常见的一种药物，可以令许多濒临死亡的感染性疾病患者起死回生，但有些抗菌素也有很强的毒副作用，比如有些会损害位听神经，表现为眩晕、耳鸣和耳聋等内耳症状，因此医学上把这些抗菌素称作“耳毒性抗菌素”。耳毒性抗菌素包括链霉素、双氢链霉素、新霉素、卡那霉素、庆大霉素、多粘菌素、万古霉素、春雷霉素等。链霉素在临床中应用得最为广泛，因此发生中毒的机会也最多。据国内对链霉素中毒性耳聋患者的统计，每天注射1克链霉

[1]　斐宏恩：《耳聋与复聪》，科学普及出版社 1986 年版。

素，一天即出现毒性反应者占14.9%，注射到16~20天时，中毒反应率便达到35.7%；注射200克以上的人，听力有损害的占59.7%。可见链霉素中毒导致耳聋的发生率是不能低估的。

笔者曾对北京第四聋哑学校的部分在校生进行过一次问卷调查，发现被调查者绝大多数是由于发烧用药不当致聋。有鉴于此，全社会都应注意保护孩子的听力健康，尤其在用药的问题上必须慎之又慎。

患链霉素耳中毒后如果及时停药，症状多半可以在短期内缓解；反之，症状会急剧发展，产生耳鸣和听力减退。这种病人的听力表现为功能不良，比如听音叉或听力计发出的纯音表现还不错，但听语言不灵，这是因为中毒损害范围比较广泛，对语言进行分析的大脑功能也受到影响的原故，患者对语言往往“只闻其声，不解其意”。这种残存听觉还对强声敏感，表现为“小声听不见，大声受不了”，再加上伴有顽固的耳鸣、尖叫声、嘈杂声，整日整夜不绝于耳，所以对病人来说，链霉素中毒性耳聋比其它原因造成的耳聋更为痛苦。

四、强噪声刺激

研究证明，普通噪声容易引起听觉疲劳，而强噪声则会导致听力减退和听觉器官的损伤，严重者则造成失聪。

初到噪声环境中工作的人，都会发生一时性的耳鸣和听力下降。这是听觉疲劳的表现，经过休息可以逐渐恢复。如果长年累月接受噪声刺激，强烈的声波在内耳中掀起激烈的淋巴液波动，会使基底膜上的听觉毛细胞以及螺旋神经末梢产生器质性的耗损变性，最终引起难以恢复的“噪声性耳聋”。噪声对耳蜗的损伤，以耳蜗的基底膜末段的病理改变最为明显。有资料显示，频率为4000赫兹左右的声音最容易损伤听力，这正是基底膜末端所感应的频率范围[1]。由于该频段属于常用的语言频率之外，所以病人初期并不感到有严重的听觉障碍，如果继续接受噪声刺激，耳蜗受损部位波及面会加大，听力损失范围将从4000赫兹左右的频段向语言频率区域扩展，病人就会感到听力减退，但此时再去找医生治疗，听力肯定已经有相当程度的损失了。

五、老年性耳聋

随着年龄的增长，人的听觉器官会发生老化，导致“老年性耳聋”，主要表现为对高音的感知困难。根据统计，婴儿的听力可感知20000赫兹的高音，成年人的高音上限是16000~18000赫兹，50~60岁的人只能感知10000赫兹以内的声音，超过60岁可感知的高音在6000~8000赫兹以下[2]。

---

[1] 斐宏恩：《耳聋与复聪》，科学普及出版社 1986 年版。

[2] 同注 [1]。

老年性耳聋分为下列四种：

1. 感觉性老年耳聋。表现为耳蜗底的蜗神经纤维和螺旋器发生萎缩退化，并逐渐向顶圈方向发展。主要是高频区听力减退，听话时对含有较多高频成份的字音，像“四十四”、“指示”等分辨不清楚。

2. 神经性老年耳聋。表现为因听觉传导路径的神经元缺失，对语言的理解能力很差。

3. 代谢性老年耳聋。表现为耳蜗血管纹萎缩，对各个频率段出现全面听力减退。

4. 物理性老年耳聋。表现为内耳的物理特性发生改变，如耳蜗基底膜变僵硬，振动不灵活，听力曲线与感觉性老年耳聋相同。

此外，有些老年人容易发生的疾病也常常影响到听力，像高血压和动脉硬化、内耳道及颈椎骨质增生等。这些病可以导致内耳血循环障碍，以致供血不足，从而导致耳蜗萎缩退化，听力下降，同时伴有头晕和耳鸣。这种病人总把注意力集中在高血压、动脉硬化上，对听力状况却不加注意，导致听力加速衰退。

第四节　听 力 检 测

检测听力的方法大致可分为主观测听法和客观测听法两大类。

主观测听法中最简单实用的是耳语检查法，具体做法是：距受试者6米处，用食指塞住另一侧耳朵，以耳语声的强度念出一些简单字句，让受试者复述。如果受试者能全部正确复述，即为听觉正常；如果相距76厘米才能听到耳语声，则听力损失在30分贝以下；在此距离能听到稍强的耳语声，听力损失在45分贝以下；在此距离能听到较强的语声，则听力损失在75分贝以下；若在此距离只能听到很强的语声，则听力损失已在90分贝左右。

耳语检查法的缺点是不够准确，不仅每个大夫（耳语者）之间的发音响度会有差异，即使是同一个人，在不同时间所发出的声响也会有差异。此外，这种检测方式极易受声场环境的影响，因此一般仅用于集体性的普通体检。

在临床上常用的是秒表检查法。秒表发出的噪声，其音色与强度固定不变，大夫以患者能听到表声的距离作为判断其听觉灵敏度的依据。受检者取坐位，闭目，检查者立于病人背后，手持秒表于受检者耳朵1米外的外耳道平面延长线上，将表逐渐移近至受检者确实听到表声时，记录这段距离。假设正常耳的听距为100厘米，受检者的听距为50厘米，则以50/100表示受检者听力衰退程度。

临床上还经常使用音叉检查法。一般将音叉敲响后放在被检者耳旁、乳突或前额部，分别测定空气传导和骨传导的听力，比较两耳间、气导和骨导间、正常耳和病耳间能听清的时间，从而评估病耳听力损失的程度，并以此鉴别耳聋的性质是属于传导性耳聋、感觉神经性耳

聋还是混合性耳聋。

随着电子技术的发展，出现了电子纯音听力计，能产生不同频率、不同强度的纯音，频率范围在125~10000赫兹，声级范围在0~110分贝，基本上涵盖了人耳听力的主要区域。它通过气导耳机和骨导耳机分别检测人的气导听力和骨导听力。有些听力计可自行绘出听力曲线，大夫根据曲线的不同类型对患者的耳聋情况做出定性、定量诊断。电子纯音听力计的不足之处，在于其判别结果依然具有较强的主观性。

至20世纪80年代，经过耳科专家和电子学家的共同努力，终于找到了一种客观测听方法——"阻抗测听方法"。使用这种方法，病人不用开口，医生便知道病人的听力状况。这种测听方法使用的仪器不是测定人的听闻状况，而是测定人的中耳声阻抗的变化。其原理是：将一定声压级的低频纯音导入外耳道，然后观测鼓膜、听骨链、卵圆窗、鼓室腔、咽鼓管以及小耳肌肉等结构在弹性、质量和摩擦力方面的反应情况。由于这种检测方式无需患者主观反馈意见和严格的隔声环境，特别适用于婴幼儿、精神病患者和其他不合作的受检者，甚至对昏迷的病人进行检测也能得出结果。

另一种客观听力检测方法叫作"电反应测听法"。该检测方法的机理是：当耳朵受到声音刺激后，听觉系统从末梢到中枢这一通道上会诱发出一系列电位变化，将这些电位变化记录下来并加以分析，就可以了解患者的听觉状况。较之身体其它电位变化，这些电位变化非常微弱，大小只有几微伏，只有借助计算机才能将其从电波干扰的背景噪声中提取出来。所记录的听觉系统末梢的电位叫作"耳蜗电图"，记录中枢部分的电位叫"脑干电反应"和"皮层电反应"。用这种方法可以客观地测定耳聋病人的真实听阈和传导通路功能（包括毛细胞、听神经和脑听觉中枢功能）。

根据听觉检测结果，医学界一般按下列标准确定受检者听觉损伤级别[1]：

表 1-1 听力分级标准

最小可听阈值（分贝）	听力状况
0−25	正常
26−40	轻度损伤
41−70	中度损伤
71−90	重度损伤
≥ 91	深度损伤

从表1-1的听力分级标准可以得知，失聪者的听力损伤情况并不完全相同，因此笼统地

[1] Douglas L.Beck: *Hearing, Hearing Loss and Hearing Aids: Issues and An-swers*. http://www.healthyhearing.com/healthyhearing（2002.07.02）.

将患有耳疾的人都称为“失聪者”并不科学。从字面上讲，“失聪者”如同“失明者”，指对声音完全没有感知能力的人，而只有当中耳、内耳以及大脑听觉神经完全被破坏的情况下，才可能出现上述情况。笔者认为，我们可以借鉴眼科医学中的“弱视”一词的用法，称听力损伤的人为“弱听者”。当然，本书只是提出上述问题，供有关专家和部门参考，考虑到读者接受习惯和行文方便，本书后文依旧沿用“失聪”一词。

第五节　保护你的听觉

中文“聪明”一词原意即指“耳聪目明”，由此可见听觉对智力的影响，更不用说对音乐生活的重要意义。谁都希望自己有一双灵敏的耳朵，前面介绍了容易造成听觉伤害的因素，我们在日常生活中应当尽可能避免这些不利因素，保护自己的听觉。例如，要尽可能避免不洁净的水流入耳道，一旦流入，要尽快用合理的方法将其排出；乘坐飞机时，要不断做“咽口水”的动作，以保持咽鼓管畅通和耳鼓膜内外压力的平衡；有了疾病，除非不得已，否则不要使用各种“耳毒性抗菌素”，尤其是链霉素等等。

此外，还要千方百计地避免强噪声给听觉带来的伤害。突发的巨大噪声，像炸弹的爆炸，开、筑路的爆破，可以在瞬间产生极大的声压变化。人如果距离这种声源很近，容易破坏鼓膜、听小骨和耳蜗这些非常娇嫩的器官组织，还可能引起内耳淋巴间隙出血、前庭膜移位、支持细胞的脂肪变性、毛细胞受损等，其后果往往是全部听阈范围的损伤，甚至导致全聋。因此如果提前预知爆炸声，一定要用手指堵住耳道，同时张开嘴巴，张嘴的作用是让声波对鼓膜产生的压力经咽鼓管从口腔排出，保持鼓室内压力平衡。

对于生活在都市的人们来说，上述诸多不利因素中最难避免的可能就是遍布周围的噪声。每天我们都生活在噪声的包围之中：马路上交通工具发出的噪音，工作环境各种机械发出的噪音，家里也有各种家电发出噪音……

然而我们毕竟还要继续生活在都市中，那么我们有什么办法来抵御噪声危害呢？笔者给出的答案是：尽可能用良性声音来掩蔽噪声。

什么是良性声音？说到底就是既不会对听觉产生伤害，还能“养耳养心”的声音。它不同于常说的“乐音”，因为乐音是要具有音高、音强、音色和音长四要素，而良性声音不一定具有这些性质，却能对听觉保护起到积极的作用。

在都市一些噪声严重的地方，我们常能见到树立着的“噪声分贝指示仪”，它能给我们指示现场噪声的强度。按人们的常识理解，只要噪声不大，就不会对人产生危害。其实，噪声对听觉的伤害并非单纯取决于强度，同时还与下列因素有关：

其一是噪声的特性。通常情况下，在强度相当的情况下噪声中包含的频率种类少且构成

不协和关系的噪声比频率种类多的噪声损伤性大(第五章对此还有详细讨论),持续出现的噪声比断续的噪声损伤性大,高频噪声比低频噪声损伤性大,骤然出现的噪声比逐渐出现的噪声损伤性大。

其二是接触噪音的时间周期。一般情况下,在有消声和隔声装置的环境下噪声强度不高,但如果在固定的时间、以较长的时间周期接触噪声也会对听觉产生伤害。

了解噪声对人的影响之后,我们就可以清楚地知道良性声音应当具有哪些特征:声音中包含的频率成份之间不能是刺耳的、不协和关系,声音持续的时间周期不能太长也不能固定,声音中的高频成份不能太多,声音亦不能骤然出现。

哪些声音符合这些条件呢?当然,首选自然是那些美妙动听的经典音乐。这些音乐的音响有高有低、有强有弱、有明有暗、有快有慢,其频谱和时间周期变化也是最丰富的,它会刺激耳蜗中的每一根纤毛、大脑听觉中枢的每一个细胞。用这些音乐抵御那些单调的噪声频谱,可以减少对人耳的不良刺激。其次就是那些自然界的声响,如风吹树叶的沙沙声,雨落大地的嗒嗒声,栖息在树林中鸟儿的歌唱,遍布在田野中的昆虫的鸣叫等。这些声音虽然不具乐音要素,但其频谱丰富,时间周期变化多端,因此不会引起听觉疲劳。如果把这些自然界音响与具有田园性的音乐一起播放,就可以有效抵御噪音。

章后思考与讨论题

1. 按通常划分方法，听觉系统由哪几个部分构成？哪些部分的作用较为重要？
2. 听觉系统中的中耳部分具有哪些功能？
3. 举例说明“骨传导”对我们的音乐听觉有哪些影响？
4. 导致后天性听觉损伤的主要因素有哪些？
5. “耳毒性抗菌素”对听觉有哪些不良作用？
6. 通常情况下，婴儿与60岁以上老年人在高频辨识能力方面的差异有多大？
7. “电子纯音听力计”为何能测得人耳的听力状况？
8. 何种噪音对人耳听觉最具破坏性？

第二章　听觉系统对音高的识别

第一节　音高识别机制的假说

“音高”（Pitch），是听觉系统对声音高度的一种认定。音高感是人们欣赏音乐的最重要的一种感觉。衡量一个人有没有音乐感，往往就看他对音高的认知能力。有的人唱歌“五音不全”，并非嗓音出了毛病，而是由于不具备准确分辨音高的能力所致。那么我们的听觉如何认知声音的高度？人类对音高的分辨能力如何？音乐家与普通人在辨音能力上有没有差异？人的音准感有没有个体和民族的差异？这些本章要讨论的问题。

首先来了解一些关于音高识别机制的理论。

经过不断探索，生理学家们已经能够基本认定听觉系统中的耳蜗是认知音高的一个重要器官，但是具体工作机理上却有着不同的理论假说，比较重要的有竖琴说、部位说和周期说：

一、竖琴说

19世纪下半叶，德国生理学家兼物理学家亥姆霍兹根据他对死者耳部解剖的结果，提出耳蜗中的基底膜如果拉直就相当于一个平板式频率分析器（见图2-1）。人耳通过基底膜上大量长短不一的纤毛与不同的频率产生共振来分析音高，较短的纤毛与较高的频率产生共振，较长的纤毛与较低的频率产生共振。这种假说被称为“竖琴说”（Harp theory）[1]，意指耳蜗中的纤毛好似竖琴的琴弦，与相应的频率产生共鸣。

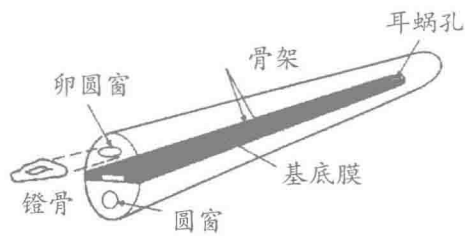


图 2-1　耳蜗中基底膜拉直后示意图

后来的研究者通过更为精细的研究发现，人类耳蜗内的纤毛与频率数并不构成一对一的关系，因为耳蜗内的纤毛数量大大超过了人耳所能感觉到的频率数，即20000赫兹。新的生理解剖资料表明，耳蜗基底膜上约有外毛细胞25000个，每个细胞上约有140根纤毛，内毛细胞

[1] H.von Helmholtz: *On the Sensation of tone, As a Physiological Basis for the Theory of Music*, 4th ed. Edited by A. J. Ellis. New York: Dover, 1954.

约3500个，每个上面约有40根纤毛，二者加在一起共计在300万根以上[1]，“竖琴说”显然无法解释如此多的纤毛是如何与频率发生共振的，随后人们便又开始寻找新的理论解释。虽然“竖琴说”理论不能圆满解释人耳对音高的分辨，但由于这是首次从实证科学角度对听觉问题的出解释，所以其影响力至今依然存在。

二、部位说

20世纪初，出现了另一种假说——“部位说”（Place theory）。这种理论认为基底膜的一定部位可与相应的频率发生共振，由此而产生波动，这种波动经由神经传导至大脑进行分析后产生音高感觉。其对应规律是：靠近耳蜗卵圆窗的基底膜感知高频，远离卵圆窗的基底膜感知低频（见图2-2）。

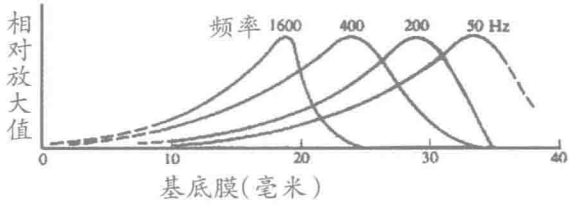


图 2-2　基底膜与音高频率对应示意图

美籍匈牙利科学家贝凯西（G.von Békésy）通过对动物和死者的实验证实：当频率发生变化时，在基底膜的相应部位确实会产生变化[2]。贝凯西因此项研究获得1961年的诺贝尔医学奖。

但“部位说”依然有不足之处。首先，它不能解释人耳对快速音高变化的识别能力。因为基底膜的波动属于机械运动的范畴，因而必然存在阻尼（物理学专有名词，意为阻碍的性质）问题，势必导致基底膜不能对非常快速的频率变化做出相应的反应。从这个角度讲，“部位说”不能回答为什么音乐家能够对音乐中快速的经过句或音阶进行做出音准上的判断。此外，“部位说”亦不能解释人耳对复合音的音高判断。因为我们平时所听到的声音绝大多数都是由多个泛音组成的复合音，依“部位说”的解释，基底膜应当对所有泛音都产生振动响应，即出现一种复合音高的感知，但实际上，我们对复合音只产生一个音高感觉。

三、周期说

针对前两种假说中存在的问题，20世纪初又出现了另外一种假说——“周期说”（Periodicity theory），这种理论认为人耳对音高的识别是以生物电的电脉冲方式完成的。其运

[1] Brian Moore. A*n Introduction to the Psychology of Hearing*. BRILL Publisher, 1982.

[2] G.von Békésy. *Experiments in Hearing*, New York McGraw-Hill, 1960.

行模式为，首先由听觉神经系统对声音频谱中的泛音分布以电脉冲的方式进行编码，编码后的信息传到大脑，再经由大脑听觉中枢神经系统按“自相关”（Autocorrelation）的程序进行解码，通过对各个泛音脉冲周期的计算，可以推导出基音所在的位置，从而在大脑中产生音高感觉（见图2-3）。由于整个过程是电信号传导，因而能够在极快的时间里完成对音高的辨识。

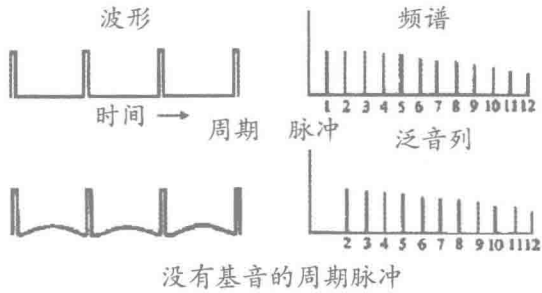


图 2-3 周期说音高识别示意图

此理论还可以解释为什么人耳可以从很小的扬声器中感受到很低的低音。按道理讲，扬声器的声音质量与纸盆的直径有很大关系，直径越大发出的声音越低，但是当我们用质量较好的耳塞听音乐时，也能感受到低音乐器的声响，其道理就在于我们的听觉系统通过对音乐中的高频泛音的周期性排列“外推”出了这些低音。荷兰科学家朔滕（J. F.Schouten）和他的同事曾对此理论进行了一系列有意义的实验，但由于实验仪器的问题而不能提供足够的临床验证[1]。

目前，一些学者倾向于将“部位说”与“周期说”结合起来解释听觉系统的音高识别问题，前者用于解释人耳对高音区域的音高识别，后者用于解释人耳对低音区域的音高识别。

四、传导理论

在音高识别问题上，还有一个难题在困扰着研究人员，即听神经如何将电脉冲信号从耳蜗传到大脑。因为神经纤维传导脉冲的速率是有限的，每秒钟只能传导1000个，对于低频声音的传导是没有问题的，令人不解的是对于高频声音该如何传送，譬如频率超过1000赫兹以上的声波信号。音乐中大量使用这些频率的声波，如果受到每秒1000赫兹的限制，那么音乐家如何能迅速识别变化多端的乐音呢？

目前科学家倾向于用群射理论来解释这个问题。群射理论认为，听觉系统中的神经纤维每次并不只传导一个脉冲，而是由纤维分组交替传导各个脉冲。例如，每秒2000次的脉冲由

[1] J.F.Schouten. *The Perception of Pitch*. Philips Tech.Rev, 1940, 5.

两组神经来传导；如果是每秒3000次的脉冲，则由三组神经来传导；由此便可以将任何高频声波信号传导到大脑听觉中枢。

读者需注意，上述所有理论解释目前仍都处于假说阶段，还有待于事实的验证。

第二节　人耳感知音高的范围

人耳对音高的感知范围——音域——到底有多宽？这个看似简单的问题至今也没有一个公认的答案。在我们的乐理书中，有的说低音为20赫兹，高音为20000赫兹[1]，也有的说16~20000赫兹[2]，还有的说8~20000赫兹[3]。笔者曾看到一本关于音乐声学的书，说有的人最低能听到5赫兹，最高能听到30000赫兹！答案各不相同的情况下，重要的是要知道这些数据是怎么得出来的。

对人类主观感知能力的探索，属于“心理物理学”研究范畴，其研究方法是：按照一定的实验流程，用精准的实验设备施放各种测试信号，然后让受试者对信号加以判别和记录，最后对这些记录进行统计整理，得出结论。

人耳辨音能力的数据也可以用上述方法获得。首先要挑选合格的受试者，身体健康状况、年龄、性别、职业等因素都要考虑其中。其次，测试环境要符合标准听音室的要求，即环境噪声不能超过30dB，混响时间一般不超过0.6秒，声场分布尽可能均匀，没有声染色；测量设备应当符合国际标准；播放的信号源要越纯越好，一般用“纯音”，即信号中只含一种单纯的声音成份；测量方式一般从中音区开始，逐渐向两端扩展，直至所有的受试者听不见为止。

值得注意的是分析统计这个环节。一般来讲，由于存在个体差异，受试者感知音域的能力不会完全相同，答案自然也千差万别。实验人要利用“测量统计学”中的一些方法对错综复杂的数据进行分析和整理。其中有两点是非常关键的：首先，某个人或小部分人的感知能力不能代表全体受试者的平均水平；其次，要考虑到受试者的“可信度”，有些人可能出于“好强”心理，即使没有听到信号也填上“听到”的答案。对此，必须用一些心理测试中的辨伪手段把不真实的数据予以剔除。

此外，即使注意了上述问题，如果受试者的组成成份发生变化，其实验结果还会有出入。已有实验证明，年龄、遗传和环境噪音等因素都会对辨音能力产生显性影响。譬如，随着年龄增长人们对高音的感知能力会逐渐下降，60岁以后下降速度还会加快。实验数据只能给出一

---

[1]　Thomas D.Rossing. T*he Science of Sound*, 3rd ed. Addison–Welsy, 2001.

[2]　斯波索宾：《音乐基本乐理》，汪启璋译，人民音乐出版社 1982 年版，第 2 页。

[3]　梁广程：《乐声的奥秘》，人民音乐出版社 1986 年版，第 6 页。

个平均的结果，如果受试者里面青少年占多数，其可感阈值自然就要宽一些；如果中老年人数居多，其阈值肯定要窄一些。

了解了人的辨音能力是怎样“测量”出来的，我们就能明白为什么在人耳可感音域问题上会有不同的标准，归根结蒂是由于人类存在个体差异而致。在人耳感音能力上，根本不存在像分水岭一样明确的界限，不仅音域问题如此，在音准、音色、音量、音程协和感等与听觉有关的问题上，也不存在固定的、精确的标准。即使乐理教科书中给出了精确的数值，我们也应持“模糊”的观点来看待。

比较科学的方法是用“区间值”的概念来描述这一类感知标准。以人耳可感音域为例，我们就可以不用固定值而采用区间值来进行定义，如“人耳可感音域，低音在16~20赫兹之间，高音在16000~20000赫兹之间”。这样描述不仅符合人耳辨音的实际状况，同时也避免了不同乐理书之间的数值冲突。此外，乐理书在给出这些数值的同时还应简单介绍一下这些数值的出处，以增加科学性和可信度。前面所述，对于人耳能够听到5赫兹和30000赫兹的说法，笔者表示怀疑，因为目前高质量的实验用音响设备，其频响范围也不过20~20000赫兹，5赫兹和30000赫兹已大大超过了这个范围。那么实验者是从何处获得这些声音信号的呢？如果不用标准的实验音响设备来获得，而是从自然界中直接获得，实验者又如何能保证其实验条件的稳定性和准确性呢？

正是基于上述疑问，笔者比较倾向人耳可感音域在20~20000赫兹之间，本人也曾经在标准听音室做过小范围的测量，并没有发现超出者（因实验人数较少故不能作为正式数据来发表）。

或许有人认为钢琴最低音 A_2（大字二组 A）的频率已经达到27.5赫兹，我们仍然很容易听到，再低十几个赫兹难道就听不见了吗？这里有一个误解：我们听到的钢琴声是一个复合音，而听音实验所用的信号是纯音，二者有本质的不同（在第七章将详细比较二者的差异）。当我们听较低的音时，听觉主要凭借复合音中的高频泛音来判别高音，而不是基音。钢琴的低音之所以比较容易听到，就是因为泛音在起作用。

第三节 主观音高与客观音高之关系

音高还有主观和客观之分吗？是的。譬如，我们凭自己的听觉感受而表达出来的音高就是主观音高，用声学测量设备得到的音高数值就是客观音高，二者之间既有联系又有区别。

二者的联系在于，主观音高感觉量与客观音高量之间构成不严格的对数关系。我们举一个实例来说明这种联系：

当我们测量到一根琴弦每秒作440次往返振动时，我们的主观听觉会产生一个音高——

小字一组 a（a^1），当琴弦每秒作880次往返振动时，我们听觉会产生小字二组 a（a^2）的音高，即提高1个八度；当琴弦每秒作1760次往返振动时，我们听觉会产生小字三组 a（a^3）的音高，即提高2个八度。由此可以看出在音高变化上，客观量（振动频率）是以几何级数增长，而主观量（音组的感觉）却是以算数级数增长，在数学上称这种关系为对数关系。

上述二者之间的对数关系只是限定在一定音区范围内，一旦超过，其对数关系就会发生一定偏离，规律是：以中音区（小字组）为中心，在低音区客观量要比正常值偏低才能与主观感觉量相符，而在高音区客观量要比正常值偏高才能与主观感觉量相符。在钢琴的调律方面可以明显看出这种关系。

图2-4是对多架钢琴音高实测的结果。横坐标是钢琴音组所对应的频率，纵坐标是音分值，曲线是钢琴的实际音高。如果严格按客观量为钢琴定音，图中的钢琴实际音高应当是一条平直的线（即正负误差为零）。从实际测量结果看，只有中音区基本是直线，其它音区则完全偏离，而且越趋向两端，偏离度越高。这种偏离所反映的，正是调音师的听觉（也代表了钢琴家和所有音乐家的听觉）与客观量之间存在的一种非线性关系，目前科学家对这种现象还不能给予令人信服的解释。但由此可以看出一点：主观音高与客观音高之间并非呈严格的对应关系，即使再好的耳朵也不可能与仪器测量的结果完全吻合，这是由人的听觉特性所决定，与耳朵辨音能力的强弱无关。

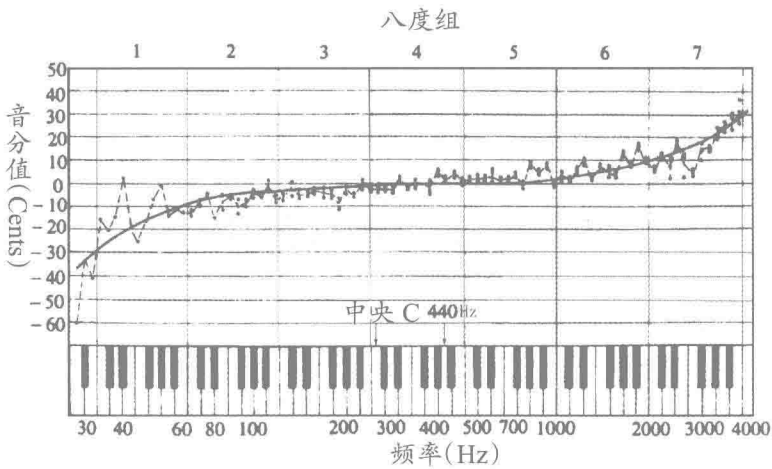


图 2-4　钢琴实际音高曲线图

注意：虚线是对钢琴实测的结果，实线是对实测数据平均化的结果，两个极端音区在音高上已经偏移出30多音分，相当于三分之一半音。

在音乐声学领域，还专为主观音高规定了一个单位“Mel”（美），人耳从最低音到最高音之间的总值为2400Mel，即以2400个主观音高梯度对应频率为20~20000赫兹（见图2-5）。此

单位仅限声学界使用，音乐界并不使用。

主观音高与客观音高的最大区别，在于前者的高度会受到外界因素的影响而改变，而后者往往是恒定不变的。同一个人如果时间、环境和心境发生了变化，其音高感觉也可能随之改变，这正是主观听觉与客观测量数据之间最本质的区别：前者是一种易变的、多重性的标准，而后者却是恒定的、唯一的标准。遗憾的是有些乐理教科书没有把这一最基本的道理告诉学生，给他们带来一系列认识上的模糊。以音准问题为例，音准感觉主要由主观音高来控制，人与人之间的音高感觉不会完全一致，在音准感方面必然也存有差异。当一个人听到不符合自己音准感的音高时，就会产生“音不准”的感觉，此时他是以自己的音准感作为衡量的尺度作出的判断。我们常常碰到这样一种现象，受过专业院校视唱练耳训练的学生，当听到一些民间音乐时，首先的反应就是“音不准”。当这种感觉掺杂了“专业人士”的自负之后，往往还会转变为对民间音乐的一种歧视。显然，这些学生已经把自己的听觉感受等同于客观标准，以为凡不符合自己音准感的音高就是错的，就要纠正。且不论这里存在一个对民族音乐学基本常识的了解问题，如果乐理教科书能够把音高的心理属性提前早告诉学生，相信会有助于学生以科学的、包容的态度去认知世界民族音乐的价值。

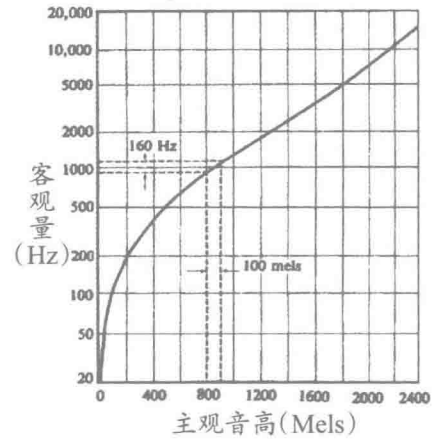


图 2-5　音高主观量与客观量对应关系示意图

注意：纵坐标是按对数关系标定的客观量，横坐标是按自然数关系标定的主观量。注意曲线在两端的偏移情况，以低音区最为明显。

第四节　最小音高差的分辨

人耳对最小音高差异的识别能力，称为“音差分辨阈”（Difference limen）或“（最小可辨音差）”（Just noted difference.）。20世纪30年代，美国心理学家西肖尔（C.E.Seashore，1866~1849）在心理实验室里对此进行了较为系统的研究。西肖尔的方法是：以一个435赫兹（约相当于小字一组a）的纯音为基准音，取另一纯音为比较音，然后不断改变比较音的音高使其与基准音构成一系列由大到小的音差供受试者听辨。西肖尔以80%受试者刚刚能分辨的音差作为最小可辨音差，其结果为3赫兹（约12音分）[1]。其中听觉敏锐者可分辨的最小音差为0.5赫兹（约2音分），最迟钝者则不能分辨一个全音的音高变化。

[1]　C.E.Seashore. *Psychology of Music*, Mc Graw Hill, 1938.

西肖尔在实验的基础上得出下列结论：

1. 人耳的音差分辨能力与智力水平无关；

2. 年龄因素对音差分辨能力影响不大；

3. 通过训练并不能提高音差分辨能力；

4. 人耳对音差最敏感的频域在1000赫兹（约相当于小字二组的 b^2）左右；

5. 音量强的音差比弱的音差易识别；

6. 遗传性是一个值得重视的因素。

还有一些科学家曾进行过有关音差分辨阈方面的实验。德国科学家茨维克尔（Zwicker）提供的实验结果显示：在小字二组 c 的高度，音差分辨阈值约为10音分，但在大字组G的高度，阈值为50音分[1]。美国著名音乐声学专家罗兴（Rossing）通过对4个受试者的测验结果提出：音差分辨阈值为任一频率数的0.5%（约合8音分）[2]。英国声学专家伍德（A. Wood）则认为：在500~4000赫兹（约相当于 b^1~b^4）这段频域内，在正常响度下人耳音差分辨阈值小于一个半音的1/13（约3音分），在62赫兹频段上分辨阈值约为30音分[3]。

笔者为撰写博士论文，1988年曾经对145位中国音乐家（主要包括指挥、乐队演奏员和数位理论工作者）进行了最小音差分辨阈的测定。实验工作所用的乐音信号包括三种音色（纯音、木管和弦乐），出现在高、中、低三个音区，选用的音差包括0，2，4，6，8，12，18，24，50音分，最后得出的结果如下：

1. 对大多数音乐家来说，音差分辨阈值为6至8音分。个体差异中存在的极端值分别为2音分和50音分；

2. 相对于普通人，音乐家在中、低音区对音高差异具有较强的分辨能力[4]。

第五节　音乐家的音准感

“音准感”（Sense of intonation）是由“音准”的定义发展而来。在本书中其定义为：人们对音乐演奏或演唱中存在的音准状况的感觉。所谓“音乐家的音准感”就是把感觉的主体限定在音乐家范围内[5]。之所以研究他们的音准感，是因为这些人与音乐的关系最密切，他们的

---

[1] Zwicher. *Music, Sound and Sensation*, Dover Publications, 1967.

[2] Thomas D.Rossing. *The Science of Sound*. Addision-Welsy, 1982.

[3] A.Wood. *The Physics of Music*, Chapman & Hall, 1975.

[4] 韩宝强：《音乐家的音准感——与律学有关的听觉心理研究》，《中国音乐学》，中国音乐学杂志出版社 1992 年第 3 期。

[5] “音乐家”在这里仅是指专业音乐工作者，没有“音乐大师”的含义。

耳朵一般来说都具备正常的听力，并具有一定的音乐素养；更重要的是，他们的音准感往往会直接影响到他人的音准感。

实际音乐中影响到音准的因素是多方面的，例如律制、演奏技巧、乐器质量，环境因素等，然而最重要和最基本的因素依然是人的音准感，因为其它因素最终都要在音准感的指挥、控制下产生作用。人们完全可以根据自己的音准感觉去选择律制，提高演奏技巧和乐器质量以至改善周围环境。

如果作深一层的分析，人的音准感又包含了两种不同的感知成份：一种是判断声音之间在高度上的一致性，可称之为“同一性音准感”；另一种是判断乐音之间相对音高（音程或音列等）关系的准确性，可称之为“相对性音准感”。就前者而言，当乐器演奏者根据标准音进行调音或乐队在进行齐奏时，主要就依赖这种感觉。换言之，人们是凭借这一感觉来达到音高的一致性，凡听力正常者一般都具有这种判断能力，因而可以说这种感觉更多地带有生理性，其音高准确性的标准也是唯一的。判断相对音高关系的准确性则更多地受到来自社会文化方面的影响。由于世界上存在着多种文化圈，生活在不同圈内的人们，其音乐心理活动自然会带有各自的特征，因此可以说相对性音准感更多地带有心理性，其标准肯定也是多样化的。

一、关于同一性音准感的研究

从文献来看，前人所做的有关音准感觉方面的研究主要集中在同一性音准感方面，主要原因可能是探讨相对性音准感的工作要比同一性音准感复杂得多。主要体现在两个方面：第一，在音高准确性的判别标准上，对同一性音准感的测试来说，人们只需考察各声部之间的音高是否一致就行了；而对相对性音准感的测试工作来说，由于存在判别音准标准多样化的问题，必然给实验工作中测听样本的选择带来困难。例如，对于一个具有强烈的五度相生律音准感的受试者来说，以十二平均律或纯律为主体构成的音乐样本中，许多音程都是不准的，反之亦然。这样一来势必给后期的结果分析工作带来不利影响。第二，从相关因素的角度来看，就目前已知的能够对人们的同一性音准感产生影响的因素只有音色、音强和时间；而对相对音准感来说，除了上述因素外，音乐中不同性质的音程、音级、调式、调性、声部位置以及旋律走向方式等，也都有可能影响到人们对音准的判断。从两种音准感的相互关系上来看，也可以认为同一性音准感更具基础性。假若一个人尚不具备良好的同一性音准感，你也就无法判断其相对性音准感的状况。

有两位德国科学家曾经用下列方法调查乐队演奏者的同一性音准感：在一支优秀的管弦乐队完成例行校音工作（以 a^1=440赫兹为标准）之后，对每个声部的音高情况进行了测量，结果发现，并非所有声部都处于440赫兹的高度，最低的为438赫兹（a^1−8音分），最高的为444赫兹（a^1+16音分）[1]。

[1] Lottermoser & Braunmuehl. *BeitragzurStimmtonfrage.* Akustisch Beihefte. 1953,5.

笔者于1988年对145位音乐家同一性音准感的测量后得出的结果是：大多数音乐家的同一性音准感具有 ±10音分的宽容度[1]。

二、有关相对性音准感的研究

由于相对性音准感相对难以研究，故文献报道较少见到。相关的研究是“音准宽容度”，即音乐欣赏者或音乐表演者对演奏、演唱音乐过程中音准偏离的容忍程度。

西肖尔曾经在他的《音乐心理学》一书中介绍过科学家通过对小提琴演奏家所奏音乐的测音结果来分析演奏者相对音准感的状况，总体来看，每个小提琴演奏家的实际音准都与标准音高有所偏离，最大者偏离达20几个音分[2]。

笔者1988年对145位音乐家的音准宽容度测量后得出如下结果：

1. 多数音乐家的和声性音准感具有 −38至 +14音分的宽容性。这意味着对于多声部音乐来说，音准偏低一些更不容易被人察觉。

2. 与其他音乐专业相比，指挥家的音准宽容度相对比较窄一些，这意味着指挥对音准的要求是比较“苛刻”的。

从以上研究成果可以看出，在音准判断上人的主观听觉不像测音仪器那样恒定、精确，存在一个宽容度区间，但也不是没有界限。

有关音准感、特别是音乐家音准感的实验数据对乐器制造商非常有用，他们可以据此来规定乐器的音高误差标准。譬如，对制造电子键盘乐器（如电子琴、电子合成器）的厂家来说，乐器的音高精度与成本有很大关系，精度定得越高，生产成本也就越高；现在根据有关的实验结果，把精度确定在一个合适的误差范围内，既可以降低生产成本，又保证大多数音乐家分辨不出乐器有“音不准”的情况。

第六节　音准感与律学研究

“律学”是中国独有的、专门研究音高规范的理论。按《中国大百科全书·音乐舞蹈卷》的解释，律学是“研究律制构成与应用的科学”[3]。律学研究的对象，“是以自成乐学体系的成组乐音为对象，从发音体振动的自然规律出发，取‘音响学’（Acoustics）的角度，运用数学方

---

[1] 韩宝强：《音乐家的音准感——与律学有关的听觉心理研究》，《中国音乐学》，中国音乐学杂志出版社，1992年第3期。

[2] C.E.Seashore: *Psychology of Music.* 在缪天瑞所著《律学》（1983年增订版）一书中，对此项内容进行了详细的律制分析。

[3] 《中国大百科全书·音乐舞蹈卷·律学》，中国大百科全书出版社1986年出版。

法来研究乐音相互之间的关系”[1]。

对人耳音准感的研究，也有助于人们对音乐实践中律制应用问题的认识。律学问题如果从音乐实践的角度去看待，其实质就是音准问题，即如何采用一种合理而有规律的方法，让音乐听起来比较“准”。从以上的讨论我们已经知道，所谓“准”与“不准”归根结底是以大多数人们的主观听觉为基础，而不是仪器。这里既有生理感知能力问题，也有心理上听觉审美习惯的认同，因此律学研究的基点实际上是建立在人耳音高感的生理和心理感知的基础之上。

从春秋时代的乐官伶州鸠谈论有关乐律问题算起，中国的律学研究至少已有2000多年的历史。中国历代律学家所关注的核心问题是如何解决黄钟“周而复始”的难题，以通俗的例子讲就是，以C音为出发点，经过十二个纯五度音程的转变后，所生成的升B音会略高于C，音高差为24音分（相当于1/4半音），二者因为不是等音而不能实现“周而复始”。这一世界性的难题首先由我国明代的乐律学家**朱载堉**（1536~1611）用数学方法给予解决，他的“新法密率”即是今天的十二平均律（Twelve-tone equal temperament）。由于古代律学家过于重视数字在律学中的作用，反而忽视了律学对音准的指导意义，使得“新法密率”的奏折一直尘封宫廷，与音乐实践毫无联系。

欧洲音乐界的“律学”研究（Study of temperament）[2]与中国律学有某些相近之处，其追求的最终目标也是解决十二音“周而复始”的问题。由于社会文化和历史发展等方面的原因，欧洲的研究模式和发展方向与中国有很大差别，最为突出的一点在于欧洲“律学”研究的动力主要是来自音准感，即音乐听觉的需要：“五度相生律”（又称“毕达哥拉斯律”，Pythagorean scale）因解决了单声音乐的音阶构成而流传于世，“纯律”（Just intonation）的出现是出于多声音乐和谐感的需要，而“自由转调”的需要又“催生”出了十二平均律。

即使在今天，我国音乐界人士一提起律学研究，似乎还是更多地与数字和历史上的律学纠纷联系在一起。与此同时，我国乐器制作和音乐表演中忽视音准基本常识的现象却依然大量存在。其实，律学研究的终极对象应当是探索丰富多彩的音乐音响与我们人类的听觉感受之间的关系，这既是律学诞生的基点，也是验证各种律学理论和假说的唯一标尺。

中外律学发展历史启示我们，律学研究中的数字只是主观听觉的一种近似的模拟，不能奢望建立在数字上的理论抽象可以穷尽所有的音乐实践，更不能本末倒置，用数字来“更正”我们的音准感。就音乐而言，音准感与律学研究的关系，永远是前者为本，后者为末。

---

[1] 中国艺术研究院音乐研究所编：《中国音乐词典·乐律学》人民音乐出版社1985年版。

[2] 由于中国“律学”所具有的独特性，在西方很难找到与之相对应的学科范畴，因此笔者出于慎重，在欧洲“律学”一词使用引号，意在引起人们对中西“律学”之别的注意。

章后思考与讨论题

1. 三种较有代表性的“音高识别机制假说”的提出者是谁？这些假说尚存在哪些不足？
2. 在音高识别上，科学家用“群射理论”来解释什么问题？
3. 通常情况人耳可感知的振动频率范围是多少？你能否测量自己的感知范围？
4. 乐理书中介绍的音乐常用音域是否涵盖了乐音的泛音成分？
5. 何谓“主观音高”和“客观音高”？二者之间有何关联？
6. 普通人耳能分辨的最小音高差是多少？你是否知道自己所能分辨的最小音高差？
7. 音乐家的音准感具有哪些特点？与常人的音准感有哪些不同？
8. 人的音准感与律学研究之间有何关联？

第三章　听觉系统对音强的识别

第一节　音强感知机理

为便于读者理解后面内容，在阐述音强感知机理之前首先介绍几个与音强相关的基本概念。

一、声压（Sound pressure）

声压，即声波产生的压力，是一种可以用仪器测量到的客观存在。声压的单位是“帕”（Pascal）[1]。人耳能感受到的最微弱的声压为 2×10^{-5} 帕，这一声压值是在1000赫兹（约相当于 b^2）的频段测得，人耳对这个频段的声压最为敏感。人耳能够感知的最大声压为 2×10^{2} 帕，比最小感知量高出100万倍。其实生活在地球上的人类，每时每刻所承受的地球标准大气压的压力，比人耳能够感知的最大声压还超出1000倍[2]，但这是一个静态（没有振动）的压力，因此不会对人耳产生伤害。而声压是动态的压力变化，所以人类对其非常敏感。

二、声压级（Sound pressure level）

由于人耳可感声压变化区间值很大（100万倍），表述起来不方便，科学家遂使用“声压级”这个物理量来表示声音的强弱，它是将某声压值（p）与基准声压（p_0）之比的常用对数乘以20得到的，用公式表达即 $20\times\log_{10}{}^{(p/p0)}$。“声压级”的单位称为“分贝”，用字母 dB 来表示。对于不同媒介物，基准声压取不同的值，例如在空气中取20μ 帕，在水中则取为1μ 帕[3]。

---

[1]　1 帕 =1 牛顿 / 平方米。

[2]　标准大气压 $=10^5$ 牛顿 / 平方米，即 1 万帕。

[3]　上述公式中，基准声压的取值是以人耳刚刚能感受到的声压为标准。人耳在不同介质中对声压的敏感度并不相同，所以不同介质要取不同基准声压。例如在空气中，基准声压为 20μ 帕（pa），在水中，基准声压为 1μ 帕。假如有一个声源，其声压为 1000μ 帕，如果在空气中，其声压级为 $20\times\log_{10}{}^{(1000/20)}\approx34$ 分贝。如果在水中，其声压级则为 $20\times\log_{10}{}^{(1000/1)}=60$ 分贝。也就是说，同样的声音在水中听起来要比在空气中响。

三、响度(Loudness)

音乐界和音响工程领域常称之为“音强”或“音量”,是指人耳感觉到的声音大小或强弱,是一种主观感觉量。

研究表明,音强的感觉主要取决于到达耳部的声压强度。在第一章中我们已经知道,声波通过外耳、中耳传导至内耳的耳蜗,声波产生较强压强时,耳蜗的基底膜感受器的活动广度较大,神经纤维的反应率也随之增加,单位时间内总的神经冲动流增加,到达脑部的神经冲动总数和强度比声压弱时产生的变化大,人就会感觉“声音大”;声压小时,基底膜感受器的活动广度比较小,神经纤维的反应率也随之减少,单位时间内总的神经冲动流也减弱,到达脑部的神经冲动总数和强度比声压大时产生的变化小,人就会感觉“声音小”。此外,中耳的耳鼓和听小骨对声波具有放大作用,根据计算,一般情况下,这种放大作用可将外耳传进的声压放大达30倍(听小骨的生理结构请参见第一章图1-2)。

当声音强度超过100分贝时,人耳的感觉会出现饱和状态。这时一个纯音在感觉上变为一个复合音,一个复合乐音将变为噪音而且人耳将失去音色的分辨能力。如果音量继续增大至110~120分贝,人耳会产生暂时性失聪,这是人耳的自我保护机制在起作用。

听觉系统的自我保护是通过两组肌肉来分别控制耳鼓和镫骨,遇有强烈声波袭来时肌肉组织会迅速紧缩,让听小骨与鼓膜和卵圆窗脱离,从而保护内耳免受超强音声波的冲击,由此可以减小声压级达20分贝。生理声学称听觉的这种自我保护机制为“声反射”(Acoustic reflex)[1]。一般当声场声压级超过85分贝时,这种机制就开始产生作用。遗憾的是,声反射启动的时间稍滞后于强声进入内耳的时间,大约晚30~40毫秒,而声反射完全发挥作用,则需大约150毫秒。因此对于毫无思想准备突发性的强声刺激(如突然发生的爆炸),声反射还是无能为力,仍会对听觉产生伤害。这有些像眼皮对眼睛的保护,虽然眼皮的反应已经相当快,但还是避免不了时常会出现“迷眼”现象。

正是由于人耳具有上述这些生理特性,才使得我们能够接受宽达120分贝的音强变化幅度;而声强一旦超过120分贝,人耳就无法忍受,对健康乃至生命都会产生不良影响。表3-1所示是日常生活中一些典型环境的平均声压级:

[1] Thomas D.Rossing. *The Science of Sound*. Addision-Welsy, 1982: 94.

表 3-1　日常生活中典型环境的平均声压级

典型环境	声强级	主观感受
飞机起飞(60 米处)	120dB	不堪忍受
打桩工地	110dB	有冲击感
喊叫(1.5 米处)	100dB	震耳
重型卡车驶过(15 米处)	90dB	刺耳
城市街道	80dB	喧闹
汽车内	70dB	嘈杂
普通对话(1 米)	60dB	适中
办公室	50dB	适中
起居室	40dB	清静
卧室	30dB	比较安静
播音室	20dB	很安静
落叶声	10dB	略微察觉
人工消声室	0dB	寂静

第二节　外耳道共鸣与等响曲线

很早人们就发现，相同音量的声音(仪器显示其声压级相同)出现在不同音区时，听起来响度(音强)会有差异。一般规律是中、高音区声音显得比较强，低音区显得比较弱。人耳听觉的响度与声音的物理强度之间关系究竟如何，许多学者都希望能够用简单的公式加以表示。

1933年，弗莱切尔(H. Fletcher)和孟松(W. A. Munson)在《美国声学杂志》上发表了他们的研究报告《响度，定义，测量与计算》[1]，两位科学家在对大量听音者进行听音实验的基础上，测绘出了人耳的“等响曲线”(Equal loudness curve)。它是以人耳对1000赫兹纯音的听感响度为基准，把其它频率点上相同响度的声压级串连成线而得到的曲线(见图3-1)。

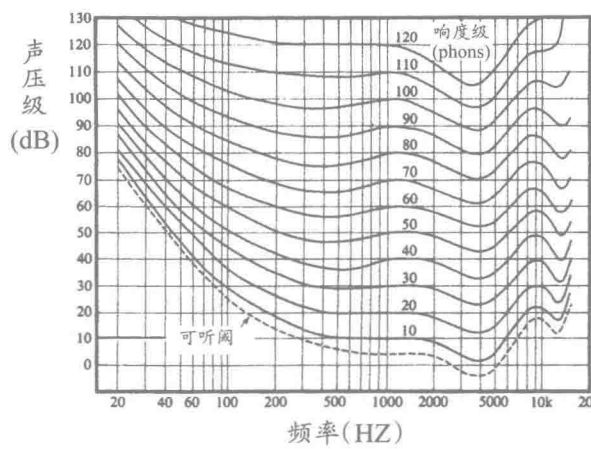


图 3-1　人耳纯音等响曲线图

图3-1中，每条曲线代表的是听起

[1] Fletcher and Munson. *Londness, Definition, Measurement and Calculation*. Journal of the Acousticel Society of AME. 1933, 6:59.

来一样“响”的响度。例如，图3-1中下面第一条实线显示：频率为20赫兹、80分贝的声音听起来与1000赫兹、10分贝的声音一样响。换言之，20赫兹的声音若要与1000赫兹的声音听起来一样响，其声压级就要提高7倍。以乐器发音为例：如果一把大提琴演奏的G音（98赫兹）为52分贝，它实际听起来与一把小提琴以40分贝演奏的b^2音（988赫兹）一样响。

通过图3-1还可以看出，人耳对500~7000赫兹左右的声音最为敏感，在音乐上大约是从小字1组b至小字5组a（b^1~a^5）的音区内，即盖了钢琴b^1以上的全部琴键并有所超出。了解了人耳这一特性，我们在进行音乐创作时就要加以注意：如果想在有中、高音声部作为和声背景的情况下，突出低音声部的一条旋律，一定要给它以足够的乐器支持，或者把中、高音区的音量压下来，否则低音旋律就很难与中、高音声部的音量相抗衡。这不是因为低音乐器本身的声压级不够高，而是人耳的听觉特性使然。

人耳为什么会有这种听觉特性？答案还是在于人耳的生理构造。从声学角度看，人的外耳耳道恰似一个共振腔管，正好能够对500~7000赫兹的声波形成共振，故而使这一音区的声音听起来显得响一些。

注意，这种共振放大与第一章中提到的听小骨所具有的声波放大作用有很大不同。第一，耳道的共振放大是有音区限制的，而听小骨的放大作用适用于全音域；第二，耳道的共振放大作用不会因年龄增长而衰退（因为耳道不会因年老而变化），而听小骨却会随年龄增长而产生机能衰退，导致“耳背”的出现。

在音乐声学界，规定了以等响曲线中1000赫兹的响度曲线为基准，每条曲线的单位称为方（Phon），用以表示响度级。譬如“10方”，即指所有与1000赫兹、10分贝的声音一样响的那条曲线，“80方”，即指所有与1000赫兹、80分贝的声音一样响的那条曲线。

但等响曲线并未标明“一个声音较另一个声音响几倍”这一主观听觉响度的关系。于是，音乐声学界又提出了一个主观听觉的响度单位——宋（sone），规定一个1000赫兹的纯音，强度在40分贝时所产生的响度即为1宋。如果一个声音从30宋增加到90宋，就意味着声音听起来比原来的声音“强”了三倍。当方的数值在40以上时，方与宋之间的关系近似线性关系；而在40方以下时，方值每下降10方，宋值则大幅度下降。对40方以上的声音，听觉有较为宽广的动态接受范

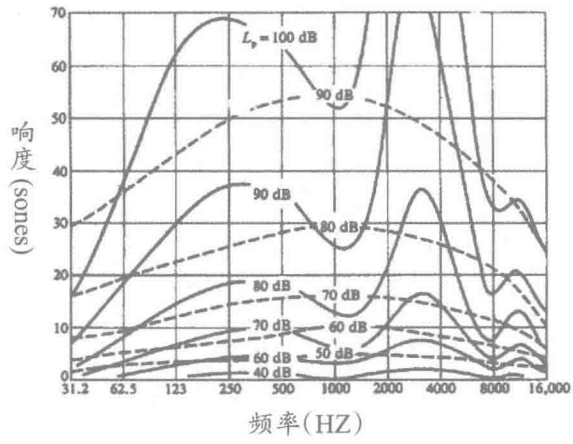


图3-2　纯音与复合音（含5个谐音）等响曲线的比较

说明：其中实线为纯音，虚线为乐音。

围，无论是用头戴耳机还是在自由声场中测试，这种关系都无太大的变化。

图3-2是以宋为单位绘制的纯音和复合音的等响曲线，该图中的曲线实际上可视为以声压级为单位的等响曲线的“倒影”。值得注意的是纯音与复合音的等响曲线是有一定差异的，主要体现在复合音的曲线相对来说比较平缓。这里可以理解为：由于复合音中包含多个泛音频率，等于把几个纯音的频率成份集合在一起，从而给听觉造成一种“平均”的感觉。

等响曲线体现了音高与音强之间的相互关系，由此可以解释许多音乐音响中的特殊现象，譬如我们用家庭音响欣赏音乐时，把音量开得较大，乐曲听起来高低音很丰富，一旦将音量减小，低音会显得明显不足，高音也无穿透力，似乎只有中音频段的音乐还能正常放出，这正是由于人耳对低音和极高音区的声音不敏感所致。

第三节　音强变化对音高感觉的影响

早在1935年，美国科学家**司蒂文斯**(Stevens)通过实验指出：在不改变频率的情况下，只改变声音的强度，人们也会感到音高有所改变。当时他使用纯音作为测试信号，其结论是：当强度从40dB增加到90dB时，将会产生大约一个全音(200音分)的音高变化。其变化规律是随着强度的增加，低音会变得更低，高音会变得更高，中音区(1000~2000赫兹，相当于b^2~b^3)只有微小变化[1]。人们称此为“司蒂文斯定律”，简称“司氏定律”。

后来，人们在对司氏定律作验证工作时发现：如果用复合音作测试，其音高变化幅度要小一些。图3-3是德国科学家**特尔哈特**(Terhardt)1979年对15位参试者测试所得结果[2]。图中显示的结果虽与司氏定律有些差异，但在总的变化趋势上基本相同。

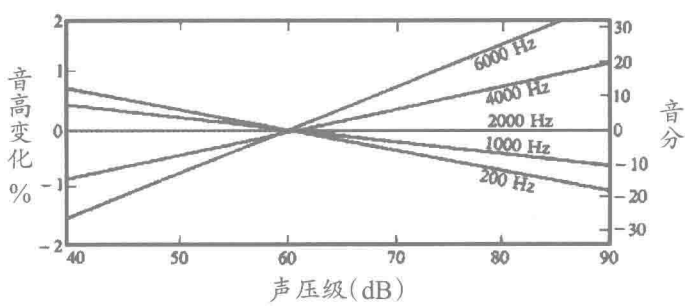


图 3-3　音强变化对音高识别影响示意图

如果将上述音高与音强之间的关系具体到音乐领域，就可以推导出这样的结果：用两件

[1] S.S.Stevens. *The Relation of Pitch to Intensity*. Journal of the Acoustical Society of AME. 1935, 6.

[2] Terhardt E. *Calculating Virtual Pitch*, Hearing Research. 1979,1: 2.

乐器来演奏相同的曲调，如果一个强一个弱，那么二者听起来在音高上会有一定差异。具体讲，如果用两架钢琴演奏一个从 C 到 c^4 的音阶（其频率皆在2000赫兹以下），一架用80分贝的强度演奏，另一架用40分贝的强度演奏，其结果，二者之间会产生20多音分的音高差异（80分贝的偏低，40分贝的偏高）。

在欣赏欧洲古典和浪漫派音乐时也时常能感到音强对音高感觉产生的影响，譬如欧洲古典交响乐第一或末乐章临近结束时，经常是以一个强有力的和弦作终止，如果仔细聆听，会感觉整个音高突然低了一点，这也是因为音高随力度加大而降低的规律在起作用。

关于音强影响音高感觉的生理机制，人们还不甚了解，类似的情况在音乐听觉中还有许多，具体内容将在第五章继续讨论。

第四节　音乐的声强范围

音乐常用的声强范围一般在25~100分贝之间（见图3-4）。正常情况下，一些高质量的弦乐器（如小提琴、二胡等）的弱奏，可以把音量控制到10分贝以下，而高水平的交响乐队以最强的力度全奏时，则可以超过110分贝，当然，具体情况还要视音乐作品、乐器质量、指挥者和演奏者的水平而定。

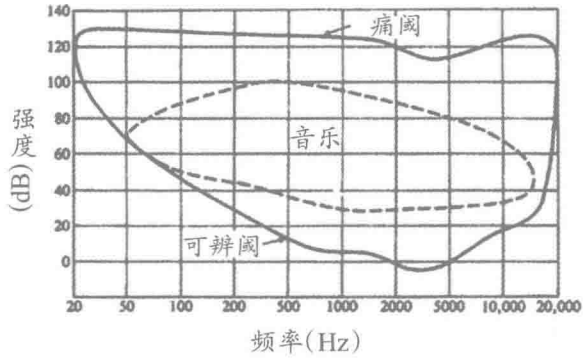


图 3-4　人耳对音高和音强的感知范围示意图

注意：音乐的感知范围只是取一个平均值。实际音乐中总会有个别乐段的强度要超过图中标示的范围。

如果把人耳对音强的感知与对音高的感知能力作一类比，可以看出，人耳对音强变化的分辨能力大大低于对音高变化的分辨能力。本书第二章已经介绍，人耳对频率变化的分辨率最小可以达到0.5%（约8音分）。如果按同一比例换算成音强变化，仅为0.05分贝，而事实上，即使再灵敏的耳朵也无法分辨如此细微的音量变化。

也正因为如此，在音乐上人们一直采用定性而非定量的强度指示系统，诸如“强”“弱”，或者“*f*”“*p*”等，这一强度标示体系只是由作曲家给演奏、演唱者提供一个相对的力度变化指示而已，谁也无法规定其具体的声压值到底是多少分贝。但根据声压级公式，我们可以大致推算出乐器数量与音量之间的关系。

以小提琴为例，假如一把小提琴正常演奏时的平均声压为1000μ帕，其声压级则为 $20\times\log_{10}^{(1000/20)}\approx 34$ 分贝，如果两把小提琴同时演奏，其音量为 $20\times\log_{10}^{(2000/20)}=40$ 分贝，如果

小提琴数量再增加一倍，其音量约为46分贝。依此类推可知：乐器数量增加一倍，其实际音量并非扩大一倍，而是增加约6分贝。如果想真正让小提琴的音量增加一倍（68分贝），实际小提琴数量须达到48把。

音乐声学和电声学中把声音强度变化的范围，称为“动态范围”（Dynamic range），它是衡量电声器材性能的重要指标之一，也常用来评价一件乐器的发音性能。动态范围越宽，表明乐器的发音性能越好，如果一支交响乐队全部用动态范围较宽的乐器，其整体表现力必然优异。下表是一些常见管弦乐器的动态范围：

表 3-2　一些常见西洋管弦乐器的动态范围

乐器种类	平均动态范围（dB）[1]	最大动态范围（dB）[2]
小提琴	14	40
中提琴	16	–
大提琴	14	–
低音提琴	14	30
竖笛	–	10
长笛	7	30
双簧管	7	–
英国管	5	–
单簧管	8	45
巴松	10	40
小号	9	–
长号	17	38
圆号	18	–
大号	13	–

由表3-2可看出，单簧管的音强动态范围比较宽，最大动态范围可达45分贝；而竖笛的动态范围则比较窄，最大范围只有10分贝。

[1] M.Clark & D.Luce. *Intensities of Orchestral Instrument Scales Played at Prescribed Dunamic Markings*. A Journal of Audio Engineering Society. 1965, 13.

[2] B.Patterson. *Musical Dynamics*. Science of American. 1974, 231(5):78.

第五节　音乐中的“掩蔽效应”

声音也像色彩一样具有“遮掩”效能，即一种声音掩盖另一种声音，声学上称之为“掩蔽效应”（Masking effect）。声音的掩蔽问题在音乐创作中是很值得注意的，例如，在一部交响乐中，如果在配器和指挥上不加以注意，各声部间很容易发生声掩蔽，由此影响整体音乐艺术效果。一般人都会认为较强的声音肯定会掩盖较弱的声音，但事实上并非如此，掩蔽效应与相互作用的两种声音的各自性质有很大关系，包括它们是纯音还是复合音，是乐音还是噪音，两个音的距离是近还是远等等。科学家经过实验总结出如下规律：

一、音高上距离较近的纯音比较远的更容易发生声掩蔽

当两个音的距离等于或小于一个全音时，就会发生掩蔽效应。音乐声学上称这个距离为“临界带宽”（Critical band）。当两个音的距离大于临界带宽时，就不会发生声掩蔽。临界带宽会随声音性质的不同而改变，但总的趋势是距离较近的声音更容易产生掩蔽效应。

二、较高的乐音更容易被较低的音所掩蔽

在钢琴上弹奏一个小二度音程，人们往往更容易听到的是较低的那个音。科学家从听觉生理角度对此给予的解释是：耳蜗基底膜对声音的刺激反应有一个渐强的过程，当两个音同时刺激基底膜时，较高的音处于膜的前部（靠近卵圆窗），其波峰会被较低的音所干扰；而较低的音处于基底膜的后部，其波峰不会被较高的音所干扰，因此较低音的信号强度会略高于较高的音[1]。

图3-5显示了当基底膜受到A、B两个纯音信号刺激时出现的反应情况：

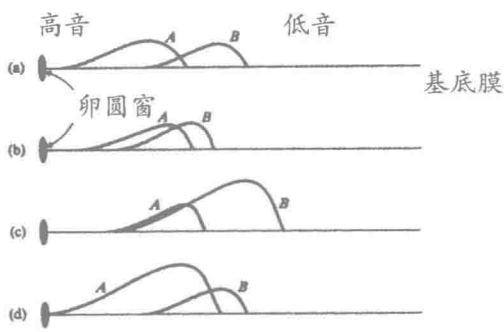


图 3-5　基底膜受到 A、B 两个纯音信号刺激时的反应

[1]　Thomas D.Rossing. *The Science of Sound*, Addision, Wesly, 1982: 91.

图3-5中，(a)表示当A、B两音强度基本一致且距离稍远时，二者会发生轻微掩蔽；(b)表示当A、B两音强度一致但距离较近时，A音往往受到B音的掩蔽；(c)表示当B音强度大于A音且距离较近时，A音会被B音完全掩蔽；(d)表示当A音强度大于B音且距离较近时，A音依然不能完全掩蔽B音。

三、较强的声音可以掩蔽较宽的音域

喜欢听音乐的人或许都有这样的体验，当某件乐器以较强的音量独奏时，就会“压住”其它的乐器声部。譬如在协奏曲的演出过程中，独奏乐器虽然“孤军奋战”，却能掩蔽整个交响乐队的音域范围。

图3-6是一个400赫兹纯音(g^1)在不同声压级可以掩蔽的音区范围[1]。从图中可以看出：当这个纯音为40分贝时，仅可以对音高在300~600赫兹、强度在0~10分贝音区内的声音加以掩蔽，但是当400赫兹的纯音达到80分贝的声压级时，则可以对0~6000赫兹($\sharp f^5$)、0~40分贝范围内的声音加以掩蔽。

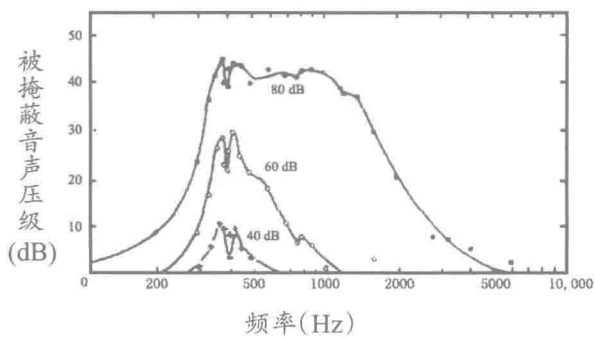


图 3-6 纯音掩蔽区域示意图

四、距离较远的声音之间很难发生掩蔽效应

根据图3-6还可以看出，即使将400赫兹纯音的声压级提高到80分贝，也不能掩蔽6000赫兹以上的哪怕是极为微弱的乐音。这就提示作曲家，要想突出某一声部的旋律，可以采取把音区“让开”的手段，以免产生声掩蔽。法国19世纪著名作曲家、配器天才柏辽兹在其《幻想交响曲》第三乐章中，用木管乐器在高音区吹奏虚无缥缈的“幻想”主题，同时用定音鼓在低音区轻声地滚奏模拟隆隆的雷声。虽然二者音量很接近，但由于音区距离较远，因此依然可以互不干扰(掩蔽)，每个声部都能清晰可闻。

---

[1] J.P.Egan & H.W.Hake. *On the Masking Pattern of a Simple Auditory Stimulus.* Journal of the Acoustical Society of AME. 1950, 22:622.

我们平时听到的噪音一般都局限在一定的音区，根据距离与掩蔽效应成反比的原理，我们根据周围噪音的性质来选择音乐，以保证良好的欣赏效果。譬如，汽车内的噪声一般以低频为主，我们在车内就可以选择听一些高频成份较多的音乐，音量无需开得很大就可以听得很清楚。如果听低频成份较多的音乐，就要把音量开得很大，声压级一般要超过噪声的一倍以上，否则音乐就会被噪声所掩蔽。但是过强的音量本身对听觉也是一种不良刺激，特别是100赫兹（约等于大字组G）以下的声音，如果振幅过大，将会引起人体胸腔共振而产生强烈不适感。所以不要用与噪音音区相近的音乐来抵御噪音干扰。这种做法只能给听觉带来更多的不利影响。

五、两只耳朵可以互相掩蔽

这是科学家做的一个比较极端的实验：让一只耳朵聆听乐音，而让另一只耳朵接收相同音量的噪音，结果乐音信号被噪音所掩蔽。这种情况被称为“中枢掩蔽”（Central masking），即意味着这种掩蔽效应是在大脑中枢产生的。这种情况在日常环境中也会经常碰到，比如我们在比较嘈杂的环境中打电话时，经常要用手捂住那只没有话筒的耳朵，以避免外界噪音干扰，就是为了防治“中枢掩蔽”的发生。

章后思考与讨论题

1. 人耳对哪个频段的声压感觉最敏感?
2. 人耳能感知的最大声压比最小感知量高出多少倍?
3. “声压级”与“声压”是什么关系?如何用公式表达?
4. 目前用来标示声压级大小的单位是什么?英文缩写是什么?
5. 听觉系统中哪些部位具有“放大声音”功能?原理是什么?
6. 何谓“等响曲线”?它与人耳哪个部分有密切关联?
7. 音强变化是否会影响到音高感觉?其规律是什么?
8. 常规音乐使用的声压级范围是多少?据你所知何种类型的音乐声压级普遍比较大?
9. 听觉的“掩蔽效应”具有哪些规律?你自己是否有亲身体验?

第四章　听觉系统对音色的识别

第一节　定义及评价体系

一、关于音色的定义

“音色”是乐音四要素之一，该词源自法语“Timbre”，英语为“Tone color”。较之“音高”和“音强”而言，“音色”一词因借用了视觉范畴中的色彩概念，却又与颜色没有任何联系，故在词义的界定方面存在较多分歧。

众所周知，人们对色彩的感知虽然具有一定主观性，但因其色彩本身具有可视性和直观性，因此一般情况下除了色盲，普通人对某一种颜色的认定不会有根本上的分歧。谁都不会把红色说成绿色，更不会犯“颠倒黑白”的错误。音色则不然，因其看不见摸不着，更没有专门测量音色的仪器，大家都是凭自己的主观感受来表达观点，因此如何定义“音的色彩”就成了令众理论家头疼的事。有的词典干脆用排除法来定义这个词，谓之“能够将音高、音强都相同的两个音区别开来的一种声音属性”[1]。其实这个定义也不完整，因为除了音色之外，还有一个“音长”的因素也能将音高和音强相同的乐音区别开来。

中文原本有一个很好的词可以表征乐音的这种属性，那就是“音品”，对应的英文为“Tone quality”。顾名思义，是指声音的品质，这一定义既包含了通过主观感觉对声音的性质作出判断的意思，同时又避免将声音与色彩联系在一起，但自20世纪下半叶以来，我国基本乐理教科书和词典多采用“音色”的称谓，“音品”一词遂淡出。笔者认为，为了避免在词汇的使用上增添新的麻烦，继续沿用“音色”依然可行，但需要阐明该词的确切含义，避免给众人带来理解上的困难。在此，笔者参照有关词典，给出下列定义，意在抛砖引玉：

音色，乐音的品质特征，能够将音高、音强和音长都相同的两个音区别开来的一种声音属性。

在一些非音乐专业的场合，人们常常以“音质”来形容声音的品质，其实质含义等同于音乐中的“音色”。该词常被运用于：对乐器声音品质的评价、电子音响录音和播放设备，以及

[1] *New Grove Dictionary of Music and Musicians.* Ediyed by Sadie. S.London: Macmillan Press, 1980.

音乐音响制品(如磁带、激光唱片)的声音评价。

二、音色的评价术语体系

音色不仅存在定义上的难题,同时还有多种不同评价术语体系的麻烦。与音高、音强和音长不同,音色本身没有区别分明的级度变化和对应的物理量。音高的级度变化可以用音程音分值的大小来表述,也可以用频率计来测定;音强的级度变化可以用*fff*到*ppp*的强弱变化来体现,也可以用声级计来测定;音长的级度则可以用拍子和时间来标定。虽然音高、音强和音长三者的主观感觉与客观数据之间并不是一种直线关系,但测量数据毕竟可以给我们提供一种客观参照系,而对于音色来说,要想找到这种客观参照系却是非常困难的事。到目前为止,还没有出现一种比较确定的量化体系,更缺乏一种公认的评价术语体系。

由于文化背景、语言习惯和专业领域的不同,人们对音色评价时所使用的术语体系也不尽相同。有的比较简单,仅用"暗淡—明亮、冷—暖、纯净—丰富"来评价所有的音色[1];有的稍微复杂,如运用"朦胧—尖锐、坚实—松散、丰满—空洞、多色彩—无色彩"等词汇[2];我国音乐声学工作者曾提出15种表达术语,包括诸如"紧张—松弛、圆润—尖锐、硬—软、和谐—粗糙,冰冷—温暖、清晰—模糊、丰满—单薄"[3];有的评价体系比较庞大,如丹麦人斯塔菲尔德(Staffeldt)的评价体系由35个术语构成[4],而瑞典的加布里森(Gabrielsson)则采用了55个词汇[5]。

最难进行音色描述的,当属乐器(包括人声)领域。由于世界上有成千上万的乐器种类,把它们的声音用某一种音色表述体系加以概括,可能是个天量的工作,因为每件乐器的音区不同、用不同强度和演奏方法,发出声音效果不尽相同。仅就长笛这件乐器来说,根据《管弦乐队乐器法》,其所使用的音色表述词汇就达13种之多[6]。

考虑到音色问题比较模糊,不利于音乐教学,我国音乐教育工作者从乐理教学角度,用专

---

[1] 1976年由Pratt和Doak提出。

[2] 1974年由von Bismarck提出。

[3] 包紫薇:《音质评价方法学的有关问题》,中国声学学会电声学分科第一届学术交流会论文,1986。

[4] H.Staffeldt. *Correlation Between Subjective and Objective Data for Quality Loudspeakers*, J.audio Eng. Soe., 1974, 22:402.

[5] Alf Gabrielsson & Bjõrn Lindstrõm. *Perceived Sound Quality of High-Fidelity Loudspeakers.* J.audio Eng. Soe., 1985, 33:33.

[6] 具体为低音区:纯、浓、不稳定,中音区:甜、透明、柔和,高音区:清晰、抒情、柔软、饱满,最高音区:清晰、尖锐、刺耳;详见施咏康:《管弦乐队乐器法》,人民音乐出版社1987年版。

门术语对不同性质的和弦色彩作了程度上的划分，提出了“色度差”的概念[1]，首次将级度引进音色的表述体系中。“和声音程色度差”和“和弦色度差”的内容如下表4-1、表4-2所示：

表 4-1　和声音程色度差

清亮色	同度、八度、纯五度和纯四度
次亮色	大三度和大六度
暗色	小三度和小六度
浊亮色	大二度和大七度
浊暗色	小七度
浊色	三全音(一切增减音程)
重浊色	小二度

表 4-2　和弦色度差

明亮色	大三和弦
柔暗色	小三和弦
浊亮色	增三和弦、大七和弦
次浊亮色	大小七和弦
浊暗色	小小七和弦
浊色	减三和弦、减小七和弦
重浊色	减减七和弦

表4-1，表4-2所述体系虽仅限于音程与和弦的范围，但把同一种音色给予级度化的做法值得推广运用于其它音色表述领域。

人们在“音色”的定义和评价术语体系上存在不同倾向，原因有多种，但基本因素来自两个层面，一是生理上存在的个体差异，二是文化心理上的价值取向。这方面的问题将在第二节和第四节继续探讨。

对音质的评比一般要包括主观和客观两方面的检测。客观方面的检测主要包括“频谱”“声强”“信噪比”“隔离度”（针对立体声音乐制品）等。主观检测主要是依靠评审者(即所谓“金耳朵”)在标准听音环境中仔细聆听被检测的音响产品，然后依据标准的评价用语将

[1]　此概念由江西教师进修学院王大昌教授提出。详见孙从音、马东风主编：《基本乐科教程》，上海音乐出版社 1996 年版，第 224~228 页。

主观感受记录下来。

最常使用的形容音质总体状况的标准用语有：

1. 融合感，用来表达整个乐队或合唱队中的各声部之间、独奏乐器与协奏乐器之间，歌唱与伴奏之间音响融合的程度。

2. 真实感，这主要是针对电声和电子乐器而言。电声系统的高保真问题就是要求通过电声接收、放大后尽量保持声源的原状和特点，还要保留一些与音乐关系密切的辅助信息，如钢琴的击键声、歌唱演员的呼吸声以及特定环境中的声反射感觉等。真实感也包括电子乐器模拟产生的音色与相关传统乐器音色的相似度，目前对此还没有形成一致的意见，因为有人认为电子乐器应当有自己独特的音色体系，而不必拿传统乐器作为衡量的标准。

3. 空间感，主要衡量音质的空间效果，是否能体现出特定的空间环境，如果是立体声声源，则要衡量其声像位置的分布是否正确，音乐是否具有一定宽度和纵深感。

4. 临场感，是针对电声系统的声音效果而言，与“真实感”有一定重叠，但临场感更关注录音和重放技术对音质的影响。

第二节 听觉系统对音色的感知机理

关于听觉系统对音色的感知机理，较为成熟的理论有如下两种：

一、谐音列说

这一理论首先由亥姆霍兹于1877年提出。经过对多种乐器以及声带所做的一系列实验研究之后，他认为所有物体在振动时都会有谐音产生，谐音列就是将这些谐音按音高顺序排列而成的序列（对谐音更详细的阐述请见本书第七章）。亥姆霍兹的理论指出，谐音列的变化对音色感觉的影响最大。不同的谐音列作用于人的听觉系统，耳蜗中的基底膜就会对这些谐音频率进行分析、合成，最后在大脑中生成不同音色的感觉[1]。

此外，基于实验结果，他还提出了谐音列与听感之间存在的四种相关规律：

1. 包含简单谐音的乐音（如音叉或管风琴的闭管），大多听起来非常轻柔、悦耳，但是在低频段比较黯淡。

2. 带有6个以上谐音的乐音（如钢琴、圆号和人声）听起来更丰满、更具乐音的效果。

3. 只含有奇数谐音的乐音（如单簧管、管风琴的闭管），听起来比较空洞。如果基音比较强，总体音色仍比较丰满；如果基音强度较弱，则听起来声音很薄。

---

[1] Helmholtz. *On the Sensation of tone as a Physiological Basis for the Theory of Music,* 4th ed. Edited by A.J.Ellis. New York: Dover, 1954.

4. 带有很强的第6和第7号谐音的复合音，音色极为突出，但听起来比较生涩、短促。

后来的科学家发现，除非受过特殊训练，否则人耳对于谐音的变化并不十分敏感。对普通人来说，如果一种音色中的某一谐音频率和强度发生变化，对音色感知基本没有影响。因此，对于一些听力障碍者来说，中高频的听力损失并不影响他们分辨音乐中的音色。

二、起始状态说

前面所述亥姆霍兹的研究和结论都是基于稳态的乐音结构。20世纪下半叶以后，研究人员发现人们对音色的感觉除了受谐音列影响外，还与乐音的起始状态有很大关系。乐音的起始状态就是乐音从无声到有声这一瞬间的状态。科学家认为我们的听觉是通过对起始状态中的谐音能量变化进行分析，从而能够识别音色[1]。

图4-1是含有5个谐音的管风琴声音的起始状态示意图。其中，左图显示的是声音在50毫秒内从无声达到最响时的总体波形，右图显示的是在50毫秒内各个谐音的能量变化：第1号谐音（基音）到达最大值然后保持其强度，第2号谐音最快达到最大值然后迅速下降，第3、4号谐音顺次达到最大值然后也保持其强度，第5号谐音能量极小，几乎没有能量变化。

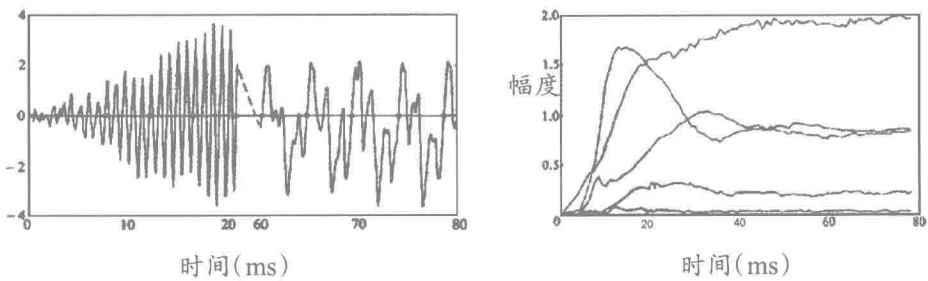


图 4-1　管风琴发声瞬态谐音能量变化示意图

科学家还做过这样的实验：把一些管乐器发出声音中的音头和音尾都去掉，然后再让乐队中演奏这些乐器的演奏员来分辨，结果很多演奏员对自己经常演奏的乐器发生误判，详细情况见表4-3[2]。

[1] 该理论由 J.S.Keeler 于 1972 年提出。

[2] K.W.Berger. *Some Factors in the Recognition of Timbre.* Journal of the Acoustical Society of AME. 1963, 36:1888.

表 4-3 管乐器分辨实验结果，受试人数 30 人

判断结果 乐器种类	长笛	双簧管	单簧管	高音萨克斯管	中音萨克斯管	小号	短号	圆号	中音号	长号	不能判断
长笛	1	2		1	6	5	4			4	7
双簧管		28									2
单簧管	1	1	20	4	3						1
高音萨克斯管			25	2	1						2
中音萨克斯管				3	4		1	11	5	5	1
小号	8				6	2	3	4	1	3	3
短号		1				12	15				2
圆号	1			2	3			5	6	6	7
中音号			1	1	2	3	2	4	7	3	7
长号	2	1		5	3			1	5	9	4

从表4-3中可以看出，正确判断率超过50%的只有双簧管（93%）和单簧管（67%），仅占乐器总数的20%。误判率最高乐器竟然是大家经常听到的长笛，30个人中只有一个人作出了正确判断。由此可见，假如去掉了起始状态，我们对平时最熟悉的音色也会作出错误判断。

我们还可以用一个很容易做到的实验再来证实上面的理论。把一个正常录制的声音反过来播放（在计算机上用音频编辑软件可以很容易做到这一点），重放的音响效果与正常播放时的效果大相径庭，丝毫感觉不倒原来的音色效果。上述例子说明，音色与时间有着密切联系。

在电子乐器发展的早期，乐器设计师都是按照每件乐器的谐音列去合成音色，根本没有考虑起始状态因素，结果电子乐器所发出音色与真实乐器仍然有相当大的距离（大家听一听早期电子琴发出的声响就可以感觉到这一点）。后来，设计师把每件乐器的起始状态这一因素加进去，电子乐器才越来越像真实的乐器。今天的新型电子合成器不仅可以模拟任何乐器的起始状态，甚至可以模拟某一件乐器的各种起始状态，譬如小提琴的拨奏、拉奏、跳弓、断弓等各种不同的起始状态，逼真程度大大提高。

显然，谐音列和起始状态对音色感知都具有一定的影响力。但是哪一项对音色识别影响最大呢？有两位科学家通过实验指出：上述两项因素在不同的乐器上会产生不同的影响力，对双簧管、单簧管、巴松、大号和小号这些乐器来说，谐音列的影响力要大于起始状态；对长笛来说，起始状态的影响力要远远大于谐音列；而对长号、圆号这些乐器来说，谐音列和起始状态的作用则不相上下[1]。总体上讲，只有极为特殊的乐器音色，其谐音列才能不依赖起始状

[1] W.Strong & M.Clark. *Pertuabations of Synthetic Ochestral Wind-Instrument Tones*. Journal of the Acoustical Society of AME. 1967,41:277.

态而单独发生作用。

此外，相位也会对音色的识别产生影响。同样是长笛的音色，分别在小房间和大礼堂听效果就不同，其中就有相位变化的因素在起作用。综合起来看，人耳主要通过分析声音的谐音列结构和起始状态来获得“音色”的感知。

第三节　影响音色感的客观因素

既然人耳通过分析声音的谐音列结构和起始状态来获得“音色”的感知，那么只要这两个因素中任何一个发生变化，就会影响我们的音色感。

谐音列是乐音中所包含的所有谐音按音高次序排列起来的音列。第一个谐音又称“基音”，其余者称为基音的“泛音”。每个乐音音色的异同，主要由谐音列的两个基本因素而定：一是谐音的数量，二是每个谐音的强度。如果谐音的数量不同，音色感肯定会有差异；假如谐音数量相同，但每个谐音之间的强度关系不同，音色也会发生变化。

有哪些因素会导致谐音列发生变化呢？根据已有的研究成果可以肯定，不同乐器之间其谐音列是有差异的，因为不同乐器的制作材料、结构和演奏方式皆有差异。同一件乐器，如果使用不同的音区和强度，也会使谐音列发生变化。以大家熟悉的小提琴为例：小提琴的四根琴弦由低到高分别为 g、d^1、a^1、e^2。现在将 g、a 两弦的谐音列以频谱形式呈示如图4-2、图4-3，从中可以看出，不同音区其谐音列之间亦有所区别[1]。

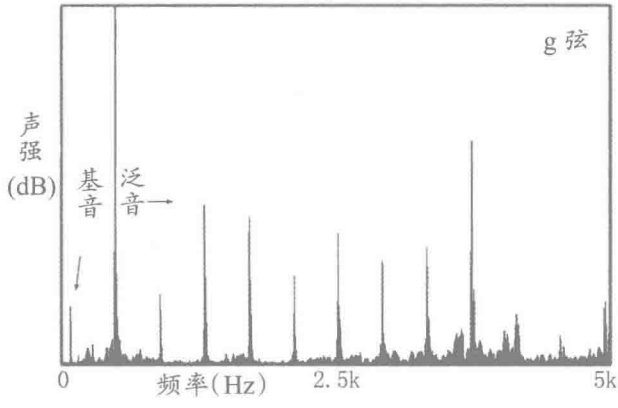


图 4-2　小提琴 g 弦谐音列(频谱)

[1] 这种能够标示谐音列频率和强度关系的图谱称为“频谱”(Spectrum)，本书将在第八章对其作详细介绍。

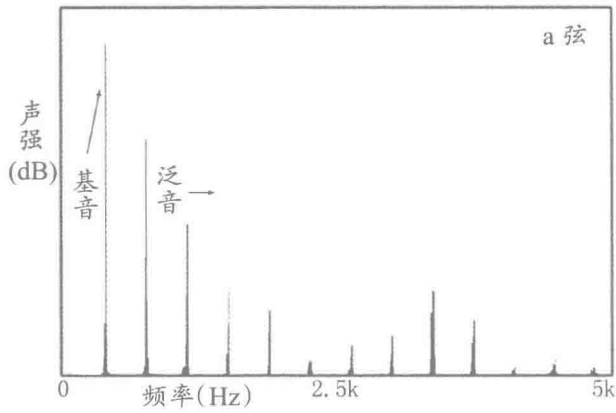


图 4-3 小提琴 a 弦谐音列(频谱)

通过两个图形比较可以看出,二者的差异如下:

1. 基音强度不同。g 弦基音很弱,a 弦基音很强。

2. 谐音之间的强度关系不同。g 弦的第 1 号泛音(比基音高八度)非常强,超过基音和其它泛音;而 a 弦泛音普遍弱于基音。

3. g 弦有较多的噪声存在(见频谱基线上方),而 a 弦很少。

等响曲线的存在,决定了我们的听觉在不同音区对音色的识别能力是不同的。总体上来讲,人们对 500 赫兹(相当于 b^1)以下音区的音色分辨能力会越来越弱,在弱奏的情况下分辨能力则更差。对 7000 赫兹(相当于 a^4)以上音区的音色分辨能力也比较弱。

除了音区因素外,强度变化也会改变谐音列状况。最明显的是歌唱家演唱时,放声高歌是一种音色,轻声低吟又是别样感觉,主要原因也是谐音列有了改变。对声乐来说,以不同的力度来演唱,声带振动的模式以及打开的共鸣腔体或窦体都是不同的,这些因素会直接影响谐音列的形态。有关嗓音声学的详细探讨见第十四章。

前面已经介绍,影响音色感觉的另一客观因素是声音的起始状态,这主要与时间因素有关。这里就钢琴演奏中的一个常识性问题作相关讨论。一些钢琴家在弹奏慢乐章作品时,当他们按下琴键后手指往往还要在琴键上轻轻揉动,好像小提琴演奏者在揉弦,据说这样可以使钢琴的音色更柔和。其实,观察钢琴发声的机械过程可知,琴槌一旦触发琴弦之后,再怎样揉动琴键也不可能对琴弦产生任何作用。由此可以断定,触键后的"揉键"动作对声音并无实质影响,但是这个动作本身会对演奏者和欣赏者的心理产生"美化"效应。

从另外一个角度讲,钢琴的音色在触键后会发生变化却是一个事实。根据前面提到的管风琴发声瞬态的谐音能量发生变化的情况可以推断,钢琴在触键后的一段时间内,各个谐音之间的能量比也会发生变化,这种变化自然会对钢琴的音色产生影响。不仅钢琴如此,凡是

不能持续发声的乐器(主要是一些弹拨性和敲击性乐器,如钢琴、古琴、琵琶、编钟等),在触发之后的一段时间内其音色都会发生一些变化。

总之探讨影响音色感的客观因素是比较复杂的工作,目前得到的一些规律依然属于初级研究成果,比如:谐音越多,声音越丰满圆润;高频谐音越多、能量越强,音色听起来越明亮,反之音色则黯淡;中、低频基音如果较突出,音色听起来比较"厚",反之音色就比较"薄";等等。笔者认为,只有先从生理和心理层面把音色感知问题搞清楚,我们才有可能真正进入对音色感知客观因素的研究。

第四节　影响音色感的主观因素

在乐器质量、电声器材和电声系统质量的评比以及一切与声音质量有关的评比中,主观评价总是必不可少的。由于评委来自四面八方,专业背景和艺术价值观不尽相同,因此在音色的评价方面往往会产生认知的偏离。造成这种情况的主要因素有如下几种:

一、对比因素

我们评价一件乐器的音色,往往是在一首或至少是在一段乐曲的演出中进行的。因此,我们对一种乐器音色的感知会受到其它乐器音色的影响,此时对比因素就会起作用。譬如,在大提琴演奏完一段深沉的旋律之后,一旦出现三角铁的音色,我们会感觉其音色异常清亮、透明;而同样是三角铁音色,如果出现在一段木琴的独奏之后,就显得没有那么清亮、透明。事实上,三角铁的谐音列没有任何改变,导致音色感发生变化的是我们的主观听觉,或者说是一种错觉。

从某种意义上讲,一部音乐作品就是用各种各样的音色"拼装"而成的,而音色的对比则是所有作曲家都时刻注意的问题。杰出的作曲大师会利用人耳在音色感知方面出现的种种"错觉",对音乐作品进行"调色"。在这方面,法国的著名作曲家柏辽兹(H.Berlioz)、拉威尔(M.Ravel)表现得尤为突出。

对于那些专门评价乐器声音品质的评委来说,要时刻提醒自己,注意对比因素给自己的评判工作带来的不利影响。优秀的评委被誉为"金耳朵",一方面是指他们的听觉敏锐,另一方面也暗喻他们的听觉具有很强的客观性,即不容易受到对比因素的影响。只有这样,才能保证评比结果的公正与客观。譬如,在听评了数把音色较为低劣的二胡之后突然听到一把中档音色的二胡,没有经验的评委可能就会给出一个高档的分数,而真正的"金耳朵"依然会从比较"客观"的角度去评判它的音色。

当然,即使是"金耳朵",听辨时间稍长而受生理条件限制,也难免产生主观错觉,故在主

观听觉评比的工作程序上，往往采取一些技术措施，如每次听评之间要播放一段比较中庸的音色，来“还原”评委的主观听觉意向。这就好像食品界的“品酒员”或“品茶员”，在品评一种产品之后要用清水漱口来还原舌头上味蕾的“活力”一样。

二、个体差异因素

个体差异对音色感的影响，主要表现在年龄和个性方面。

就年龄因素而言，第一章有关“老年性耳聋”的情况介绍，已经表明：对于同样的谐音列，老年人只能感知处于中低音区的谐音，不能感知全系列的谐音。譬如，小号的音色中包含10000赫兹以上的谐音，这些谐音对小号音色的明亮度产生极为重要的影响，老年人听不见高频谐音，自然也就体验不出“原汁原味”的小号音色。因此在遴选与音质有关的主观评价委员时，年龄因素一定要考虑其中，一般应以中、青年委员为主。

关于个性因素对音色感影响，在一些著名作曲家的作品中反映得最为突出。许多作曲家的音乐风格与他使用的乐器色彩紧密相关，例如法国印象派作曲家**德彪西**习惯于用长笛空泛、柔和的音色营造音乐的云雾[1]，**柏辽兹**偏爱用甜美如歌的双簧管音色抒发其幻想中的浪漫[2]，作曲大师**柴科夫斯基**对单簧管音色“爱不释手”，不惜在多部作品中施以“重墨”[3]，而奥地利作曲家**马勒**则对乐队加入声的混合色彩情有独衷[4]。

人们为什么会偏爱某一种音色？这个问题就像“人们为什么会偏爱某一种颜色”一样难以回答。有一点可以肯定，人们对音色的偏爱与生理和心理特征有密切联系。与生理方面的联系体现了人类在安全、自我保护和舒适度方面的一种本能，例如人们普遍不喜欢过于嘈杂、刺耳的音色（如电锯锯东西时的声音），具有过敏性体质的人对这种声音更加畏惧，因为对他们而言这种音色会使他们受到更多的伤害。就像经常在太阳下工作的人不喜欢穿深色服装，因为深色会给他们带来更多不舒适的热量。

音色与心理的联系是一个相当复杂而宽泛的研究领域，不仅涉及心理声学、音乐心理学，而且还牵扯到美学及音乐史学的范畴。例如，我们要研究历史上的作曲大师对音色的偏爱问题，就一定要深入了解他们的生活经历。从**柏辽兹**对女歌唱演员**史密森**（H.Smithson）一往情深的爱恋追求中，我们可以隐约感觉到作曲家偏爱双簧管音色的理由，因为双簧管的音色与

---

[1] 最典型的作品如：交响前奏曲《牧神午后》、交响素描《大海》等。

[2] 最典型的作品如：《幻想交响曲》《罗马狂欢节》等。

[3] 最典型的作品如：《第四交响曲》《第六交响曲》、交响诗《罗密欧与朱丽叶》等。

[4] 最典型的作品如：《第二交响曲》加入了女低音独唱、合唱，《第三交响曲》加入了女低音独唱、女声合唱、童声合唱，《第四交响曲》加入了女高音独唱，《第八交响曲》（别名《千人交响曲》）加入了8人独唱、混声合唱、童声合唱，声乐交响曲《大地之歌》中的声乐成分更为突出。

女高音以及年轻女性的嗓音有神似之处。当然，这只是千万种可能性中的一种而已，要想彻底揭开人们对音色偏爱问题的谜底，还有太多的基础研究需要进行。这有待于音乐界与心理学界长期通力合作，才能取得实质性进展。

三、民族文化传统的因素

不同民族文化传统在对声音色彩的追求上也可以鲜明地体现出来。例如中国大多数民族乐器在音色上有如下特点：

1. 比较高亢、紧张，典型的如唢呐、管子、梆笛、京胡、板胡、铙钹等。

2. 有较强的“鼻音”特征，典型的如二胡、中胡、三弦、巴乌等。

3. 音色铿锵、混杂，典型的如甬钟、编磬、编铙、编锣等。

以戏曲演唱为代表的中国歌唱体系，在音色上也具有很强的民族特色：声音比较明亮、尖细、直白，典型的如京剧中的青衣、花旦、小生等角色的嗓音。

中国民族音乐的音色特征与社会、文化、地理环境和民俗习惯有很大关系。在中国北方人口相对稀少，大多数民间音乐、戏曲多在开放式的环境中演出，声场环境基本属于自由声场（即没有反射声），即使在有一定遮挡的空间内演出，观众席中产生的噪音也比较大，因而用唢呐、梆笛、管子和打击乐器这些音色较为尖锐的乐器，能使乐声穿透观众席的噪音，到达听众的耳朵里；而在中国南方，人口相对稠密，音乐演出多在狭小、有遮挡的空间进行，因此二胡、高胡、曲笛、琵琶这些音色较为柔和的乐器就成了“江南丝竹”和“广东音乐”的主奏乐器。

相对欧洲音乐而言，中国音乐没有“和声”的概念，从音响角度也就没有声部之间要音色尽量统一、平衡的要求，因此中国的乐器音色可以很“个性化”地演奏。20世纪下半叶以来，中国民族器乐合奏形式有了很大改变，基本是以西洋管弦乐队为“蓝本”，将乐队规模和编制向“交响化”方面转变，再加上民乐作品的“奏鸣曲”化[1]，使得我们的民族乐器在音色方面已经发生了一些变化，这些变化主要表现在“个性”的削弱、“共性”的增强。特别在民族管弦乐队演奏西洋作品时，我们的听觉几乎感觉不到传统民乐的音色，这说明民族乐器的音色特征与乐队组合方式和音乐作品的风格追求有密切联系。由此可以推断，如果按照我国目前这种民族乐队组合方式发展下去，我们许多民族乐器的音色特征将会进一步“弱化”。这种状况是否有利于民族乐器和民族音乐的整体发展，很值得我们关注。

四、技术因素

有时，演奏或演唱者的技术能力也会对其音色的感知产生影响，这一点在声乐方面表现

[1] 这里笔者借用“奏鸣曲”一词，不仅指一些交响性民乐作品在曲式结构方面的特征，也包含了和声、复调和配器方面的“西化”趋势。

得更为突出。例如中国京剧界非常著名的老生演员周信芳(麒麟童),从对京剧演员的要求来讲,他的嗓音条件并不完备,音色比较暗且略带沙哑,但通过他本人在演唱技术上的加工和修饰,这种特殊的音色反而独具风格、自成一家。一些嗓音条件不太好的歌星,往往也是利用其音乐感觉和在声乐技巧方面的过人之处,增强其音色的感染力,变"不美"为一种他人难于模仿的个人风格,反而取得出奇制胜的效果。

由上述内容可知,对音色的感知永远是和音乐以及诸多心理因素联系在一起的,根本不存在公认的"好"与"坏"或"漂亮"与"不漂亮"的标准。有时,在考虑音色之外的诸多因素后,人们对同一种音色会给予不同、甚至相反的评价。以小提琴为例,孤立地欣赏时,小提琴的高音区音色很尖、很薄,但是当我们欣赏德国著名小提琴演奏家穆特(A.S.Mutter)演奏贝多芬《D大调小提琴协奏曲》高把位的音乐片断时,其纯熟的技巧将小提琴高音区的光泽酣畅淋漓地展示在听众面前,这时在我们的音色感知中已全然没有"尖"与"薄"感觉,取而代之的是"明亮""有光泽"等词汇。

第五节 人耳在音色识别上的"特异功能"

人耳在音色识别上具有许多奇特之处,有些"特异功能"直到今天也无法解释其原理,在音乐中这样的例子特别多。

一、"鸡尾酒会效应"

大家知道,协奏曲是一件或数件乐器与乐队的"音响搏斗",按前面介绍过的声音"掩蔽效应",除非乐队中没有与独奏乐器相同的乐器,否则独奏乐器的音色很容易被乐队的音响所掩蔽。譬如,小提琴协奏曲中独奏小提琴的音色会被一、二小提琴声部所掩蔽,长笛协奏曲中的长笛音色会被乐队中的长笛声部所掩蔽等,但是在音乐会上这种情况从来没有发生过。这是为什么?

根据现有的声学规律来推测,一方面有来自音乐作品本身的因素,作曲家从配器实践中总结出一套行之有效的办法来避免独奏乐器的音色被乐队"吃掉",即从音乐的节奏、音区、织体、奏法等方面使独奏乐器与乐队形成对比;另一方面,我们的听觉系统具有"过滤"功能,能够自动滤掉不想听的声音,专门接收想听的音响信息。

在日常生活中也有这样的情况。在人声嘈杂的饭馆中吃饭,周围说话的人都可视为一个个的"掩蔽声源",而你可以只听见同桌朋友的谈话,对周围声响"充耳不闻"。这一点在声学原理上很难解释清楚。可以做一个实验,把录音机放在餐馆中,录下当时在场的所有声音,待重新播放时,你会听到你和你朋友的谈话已经被淹没在周围嘈杂的声响之中,根本无法分辨

谁在讲话。这是因为录音机没有人耳的“滤波功能”。声学上把这种现象称为“鸡尾酒会效应”[1]。

二、“声纹”与音色特征识别

人耳在音色识别上还有一个特殊的本领，就是能够记住音色的本质特征，从而将某一类音色进行归纳。例如在实际生活中，我们能够记住很熟悉的人的声音特征，即使这个人患有伤风感冒，音色发生了变化，我们依然会把这种音色与特定的人物联系在一起。安全部门在开发语音识别技术的过程中，就需要深入了解人耳的这种“特异功能”，以便让机器能够透过音色变化的假象去辨识发音者的真实身份。

在音乐演奏中，由于各种乐器具有不同的品质，所以同一种乐器尽管质量不同、音色也有很大差异，但是听觉从来不会把不同品质的乐器视为不同种类的乐器。这种情况也说明，就像人类具有独一无二的指纹一样，声音中也可能存在一个核心的标志，我们姑且称之为“声纹”[2]。人耳之所以能够把握住音色的本质，很可能就在于其拥有识别“声纹”的本领。到目前为止，人们对音色特征识别的认识还仅限于前面提到的谐音列（频谱）、起始状态和相位，其它因素还有待进一步探索。

[1] 西方的鸡尾酒会是一种社交性酒会，以聊天交际为主。在这里使用该词意指周围声场环境较为嘈杂。

[2] 此词的使用，源于我国著名文学家和语音学家刘复（刘半农），他曾把分析语音用的测量仪器语图仪称为“浪纹计”。

章后思考与讨论题

1. 声音到底有没有“颜色”？音乐声学应该如何界定“音色”？
2. 你掌握几种音色评价术语体系？你认为哪种比较合理？理由是什么？
3. 目前常见的音色感知理论有哪些？它们存在哪些不足？你能否给予修正或补充？
4. 在音色主观评价中如何才能去除个体差异带来的误差？
5. 影响音色感觉的客观因素有哪些？
6. 影响音色感觉的主观因素有哪些？其中哪个因素最重要？
7. 人耳在哪个音区对音色感知能力较弱？为什么？
8. 音强变化对音色是否有影响？原理是什么？
9. 何谓“声纹”？音色与声纹有何关联？

第五章　音长识别、非线性及协和感问题

第一节　听觉对音长的识别

“音长”（Duration）是乐音四要素之一，是指我们主观上对乐音长度的感觉。与这种感觉相对应的物理量是客观时间。人们主观上对时间长度的感觉与客观时间往往有差异，生活中这样的例子很多。譬如，当我们沉浸在愉快的事情当中，会感觉时间过得很快；而做一件乏味工作时，又会感觉时间过得很慢。这种情况在音乐中也同样存在。譬如在演奏兴奋欢快的音乐时，指挥往往要注意压住乐队的速度，演奏悲伤缓慢的乐章则要防止节奏拖沓。正因为如此，乐理中用“音长”或“音的时值”[1] 来作为衡量时间的基本单位，而不是用客观的“时间”。在欧洲乐理中音长的基本单位是“拍子”，在我国传统音乐中则用“板眼”。

要探讨音长的主、客观对应情况，首先要了解人耳建立声音感觉的最短时间。科学家的实验结果证明，人耳建立声音的最短时间与声音的振动周期有关。一般情况下，需要1.4个振动周期人耳才能有“声”的感觉[2]。同时这也是人耳对最短音长的识别所需要的时间极限。振动周期就是振动体完成一个完整的振动所需要的时间，与频率是倒数关系：

$t=1/f$

其中：t 代表周期，f 代表频率。

举例来讲，假如一根琴弦的振动频率为440赫兹（a^1），那么其振动周期即为1/440秒。根据前面提到的识别理论，我们的耳朵要想听到这个声音，需要1.4个周期，其物理时间即为 $1.4\times1/440\approx0.003$ 秒 ≈3 毫秒。

由于听音过程与振动周期有关，因此振动周期越短，建立声音感觉的时间也就越短；而周期短，振动频率就高。这就意味着声音越高，耳朵识别的时间越短。假如把 a^1 提高一个八度，即振动频率提高1倍（880赫兹），其识别声音所需时间则缩短一半，约为1.5毫秒。这个规律说明，建立听觉的时间与音高成反比，声音越低，听觉需要的时间越长；声音越高，需要的时间越短。

---

[1]　斯波索宾：《音乐基本乐理》，汪启璋译，人民音乐出版社 1982 出版。

[2]　龚镇雄：《音乐声学—音响·乐器·计算机音乐·MIDI·音乐厅声学原理及应用》，电子工业出版社 1995 年版，第 49 页。

另外科学家还发现，人耳对乐音（包括纯音）的识别时间要短于噪音。譬如，一个频率为1500赫兹的纯音（约相当于#f³）和建立在同样音高基础上的一个宽度为10赫兹的窄带噪声相比，识别后者所需时间为前者的6倍[1]。从生理角度来解释，这是因为无论耳蜗中的基底膜还是大脑的听觉中枢，对纯音信号的识别都是一个相对简单的生物化学过程，因而所需时间较短，窄带噪音中包含的声音信息多于纯音，听觉系统识别它所需要的时间自然要多一些。这个实验结果从另一个角度提示了这样一种可能性：大脑对声音信息识别的时间与识别对象的复杂性有关，声音信息越复杂，需要的时间越长。

上述只是对声音最基本信息感知所需要的时间。如果想辨识出声音的其它属性，如音高、音色和音强，则需要更多时间。

在音高识别时间上，根据法国科学家沙伐（F.Savart）1840年的实验结果，音高感觉的建立至少需要2个完整的振动周期[2]。少于此，声音听起来似“喀嗒”的声响，无法建立音高感觉。

图5-1显示了音高建立与时间的关系。对于音乐的中高音区来说，建立音高感觉的最短时间在20~30毫秒之间，低音区则需要30~60毫秒[3]。

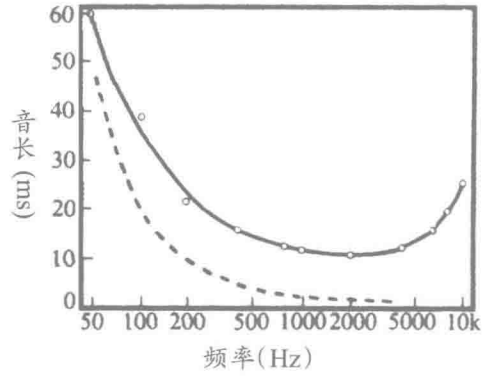


图 5-1 音高建立的最短时间曲线

说明：虚线为最短时间的下限时间（根据沙伐理论），实线为音高建立的充分时间。

我们知道，人耳对音色的识别需要借助声音的起始状态，即声音从无声到有声的瞬间过程，这一过程与振动物体的材料和激励方式有关。譬如，打击乐器的起始状态时间比较短促，那么对这类乐器音色识别时间就短；拉弦乐器的起始状态时间比较长，识别时间相应也要长一些。根据本书第四章第二节所述，识别管风琴音色所需的时间约为50毫秒。

在音强感知方面，一些实验证明耳朵对音量感知的最短时间为200毫秒，短于该时间，耳朵无法建立完整的音强变化概念。这个时间是针对纯音而言，如果是复合音或宽带噪声，时间还要再长一些[4]。

综上所述可以看出：人耳对声音四种属性的分辨能力中，对音高和音长需要的时间最短、反应最为敏锐，其次是音色，最长的是音强。

---

[1] E.Zwicker. *Direct Comparisons between the Sensations Produced by Frequency Modulation and Amplitude Modulation*, Journal of the Acoustical Society, 1962, 34:1425.

[2] Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982:107.

[3] Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982:108.

[4] Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982:94.

人耳上述特性，要求作曲家创作音乐时不能在音色和音强变化方面超出人耳分辨能力。即使当今电子乐器能够演奏超乎常人演奏能力的音乐，仍无法超越耳朵的分辨能力。例如，当我们欣赏根据俄国作曲家里姆斯基－科萨科夫（N.Rimsky-Korsakov，1844~1908）的管弦乐曲《野蜂飞舞》改编的小提琴曲时，根据作曲家的提示，乐曲速度为“急板”，即每分钟最快为220拍，考虑到作品为2/4拍，每拍由4个16分音符构成，推算下来每个音符的实际时间约为68毫秒。对于如此快速的音符变化，从理论上讲人耳对每个音高的识别是没有问题的（因为根据前面的介绍，音高识别的平均时间为20~30毫秒），但如果要在这么快速的音符上都附加音色和音强的变化，人耳无论如何也无法感知。当然这只是对每个音的变化而言，如果从总的变化趋势角度讲，人耳依然能够辨识一个乐句或一个乐段中的音色和音强变化。

另外，本节所述的识别时间，是指基础感知水平。例如，对音高的感知，是指人耳对声音高度的一种单纯的生理反应，不是对每个音符的确切高度——音名的反应。对音色和音强识别也是如此。人耳对音乐音高的识别能力，包括识别的准确性、速度和记忆能力，与先天生理条件和后天培养有很大关系，有关这方面知识属于音乐认知心理学研究范畴，在此不做深入探讨。

第二节　音乐时间的伸缩性

自计算机辅助音乐制作技术流行以来，利用MIDI键盘向计算机内输入音符已成为每个音乐制作人最常做的事情。所有弹奏者或许都有这样的体会，采用“实时”（Real Time）方式进行音符录入时，即使严格按照节拍器的节奏向机器里输入音符，屏幕上出现的乐谱也常有差错；如果不按节拍器来弹奏，其结果与原谱会相差更多。基于这种现象我们可以推断，在音乐时间表达方式上存在着两种体系：一种存在于谱面上的客观表达体系，另一种存在于由演奏者内心感觉控制的主观时间体系。

理论上讲，时间知觉是对客观事物运动的顺序性和延续性的反应。人们判断音乐事件发生的先后，比如一个音符发声在先另一个在后，就是时间顺序性的反映；判断一个音符的长短，则是时间延续性反映。任何周期现象都可以作为衡量时间的标准，人类根据地球的公转和自转现象创用“年”和“日”；为了更精细地衡量时间，又发明了各种计时器，规定了时、分、秒等时间单位。虽然这种时间单位是人为制定，但已被现代人类所采纳和遵守，具有普适性，因此可称其为“规定时间”或“客观时间”。

人们对时间变化的衡量，除依赖自然界周期变化规律外，还常以身体内部许多器官系统发生的周期性活动为依据。这种依赖体内器官系统周期性、节律性活动所产生的时间标准，可称为“个体时间”或“主观时间”。个体时间基于每个人的内在知觉，因而人与人之间存在差异。即便在同一个人身上，时间也会因情绪和心境变化而有所不同。所谓“音乐的时间”，即指存

在于音乐家——包括作曲家、指挥家、演奏、演唱者和音乐欣赏者头脑中的个体时间。

人们在从事一项活动时，除依赖规定时间外，还时常需要个体时间参与活动，有时甚至将个体时间作为主要坐标。例如，当我们朗诵诗歌时，会随情感的需要抑扬顿挫，绝不会按照秒表的速度去抒发情怀，其节奏自然也不像节拍器那么精准。这就是个体时间在起作用。音乐也如此，演奏家演奏一首乐曲，虽然依据作曲家指定的速度，但更多情况下会根据个体时间来调节速度和节奏，不会完全按节拍器来演奏乐曲。

通常演奏者情绪在演奏过程中会出现波澜，其个体时间也在不断变化，那么音符的实际时值和节拍就会与规定时间“脱节”。一般情况下，演奏家的个体时间如能与听众个体时间相一致（这是由人类一些生理共性所决定），听众就会从中感到节奏的“共鸣”，从而获得一种韵律满足感，否则音乐听起来就会显得呆板。例如，早期用电子乐器演奏的乐曲，人们有时听了感觉缺乏韵味，主要原因就是其速度和节奏都是严格按规定时间运行，虽然时值和节奏都准确无误，但与听众的个体时间不符，满足不了欣赏者情绪波动产生的个体时间变化的需要。当代电子音乐技术改善了实时可控性，增强了音乐与乐器演奏者和听众之间的互动性。

作曲家在乐谱上标明的速度，如“中速”“快板”，或明确标示出每分钟多少拍，表面上看是采用客观时间作为参照，但却是建立在作曲家个体时间的基础上。杰出演奏家和指挥家的才能之一，就是能以丰富的经验去理解和把握作曲家的个体时间，将其与自己的个体时间有机契合，同时又能以满足听众个体时间的韵律来处理，使三者之间的个体时间达到最大程度的统一。

有理论认为，个体时间的建立有赖于人体自身的生物钟机制。从生理角度来看，人类机体内任何呈周期性活动的器官或系统，都具有衡量时间的功能，因而可视为一种“生物钟”，正是人体生物钟的存在，便产生了个体时间知觉[1]。

生物钟有非常复杂的生理过程，其机制主要与两个方面有关，一是神经系统，二是非神经系统。作为非神经系统器官呈周期性活动最为明显的，就是心跳和呼吸。心脏呈周期性搏动，一缩一张维持全身的血液循环；肺部呈周期性呼吸，一吸一呼进行着气体交换。其它诸如消化系统的肠、胃等器官节律性的蠕动促使食物消化和吸收，内分泌系统周期性活动产生体温等的周期性变化，血液、尿液中化学物质周期性的改变，都是众所周知的生物钟现象。这些器官或系统的活动有其独特的调节机制，但也受神经系统尤其是植物神经的调节。植物神经与大脑皮层及皮层以下的中枢有着密切联系，因而在情绪变化时会影响非神经系统器官的周期性活动，进而影响到人的个体时间。

生物钟的另一机制是神经系统的周期性活动。感受器接收到刺激后产生神经冲动，传至效

[1] 金观源：《生物钟与健康》，福建科技出版社 1998 年版。

应器官产生器官活动，所有神经冲动都是以间断脉冲方式进行的，即神经冲动在神经纤维内以“有或无”形式传导。这种传导属于周期性活动，其频率与神经组织特性及刺激物特性有关[1]。

生物钟的调节控制中心在中枢神经系统，主要是脑的机能。关于脑的时间知觉作用早已被医学界所证明，实验证明，脑的某些部位损伤会导致时间知觉障碍。另外，从脑电图的变化也可证实，当人体处在不同的健康状况或精神状态下（如脑损伤、喝茶、饮酒、睡眠或困乏等），脑电图的形状模式完全不同。

综上所述，神经系统的周期性活动是人体生物钟，同时也是个体时间存在的物质基础。个体时间与规定时间的关键不同点，在于前者会受到生理和心理因素的影响。

音乐中有许多例证显示，时值相同的音符在同一首乐曲中实际占用的时间并不完全一致；而同样的乐曲由不同的演奏家来处理，其时间长度也不一样。西洋音乐中的“Rubato”（弹性速度）和中国民间音乐中的“散板”“摇板”，只是将作曲家或民间音乐家头脑中的个体时间，用一种“定性”的方式规定下来，在具体实施上，还有赖于演奏者个体时间感觉的契合。

通过对音乐作品音响的研究，人们还发现：个体时间还会随着年龄的增长而发生变化。譬如，美籍俄裔作曲家斯特拉文斯基（Igor Stravinsky，1882~1971）晚年指挥他的作品就比他早年的录音要快一些；英国作曲家艾尔加（E. Elgar，1857~1934）晚年在指挥自己作品的时候，常常对自己年轻时创作的音乐作品速度提出怀疑。

综合来看，音乐的时间依然是建立在规定时间基础之上的，其弹性和伸缩性亦不过是在规定时间的“框架”内的一种变化而已。相对于音色、音强和协和感知能力而言，人耳对音长的感知还是比较准确、规范和稳定的。

第三节　音乐听觉中的非线性现象

“线性”（Linearity）是个数学名词，指应变量与自变量成正比关系；“非线性”（Nonlinearity）的词义正好与“线性”相反。通俗地理解二者的意思，就是当输入量与输出量成正比例关系时（如输入量为1+1，输出量为2）就是“线性”；当输入量与输出量不成正比例关系（如输入量为1+1，输出量为3，或者为0，甚至负量），就是“非线性”。“非线性”一词被引用到其它领域时，则泛指那些用线性计算或统计方法无法解释的量变化关系。

在声学领域，人们也常常用非线性这个词来形容一些用常理无法解释的声学现象。例如，当声源叠加在一起时，我们听觉所感受的声源数量突然减少或增加了，这就属于“非线性”现象，因为用线性理论无法解释声源为什么减少和增多。

---

[1]　[法] 库德隆：《身体·节奏：生物钟与健康》，梁启炎等译，海天出版社 2000 年版。

类似的情况在音乐声学领域大量存在，在音乐听觉领域尤为突出。譬如“合成音”问题、“听觉泛音”问题、“拍音”问题、“协和感”问题，以及前面论述过的“鸡尾酒会效应”和人耳的“音高外推”能力等，都无法用线性理论解释。

研究非线性声学现象的方法，可分为定性和定量两大类。就物理声学而言，定性方法主要研究声波运动方程积分曲线的分布情况，直观地分析声波振动的情况，观察参量变化对声波的影响；定量方法则可作数值计算。由于非线性声学的复杂性，至今还没有一个能适用于各种情况的研究方法。对大多数问题来说，只能用一些方法求得近似解。

音乐声学，因涉及较多听觉生理和心理层面因素，其复杂性超过物理声学，其中不仅存在非线性声波问题，还包括生理器官和心理机能的非线性反应问题。其研究工作，单单解决一个领域的非线性问题就已经比较困难；而音乐声学现象往往涉及物理、生理和心理三个层面的非线性问题，其研究难度可想而知。特别对生理和心理层面而言，任何问题研究都要与人体和社会公众相联系，不仅需要一定的物质条件和经费支持，还有文化背景、人际交往、甚至伦理学等方面的因素牵扯，因此要对音乐声学中任何非线性问题做出深度研究都非易事。

本章后面几节将讨论几个与音乐音响联系非常紧密的非线性问题。

一、合成音

“合成音”（Combination Tone），又称“结合音”，是发生在听觉系统内的一种声音现象。其规律是：当两个乐音同时以较大音量发声时，在听觉系统中会产生第三个音，其音高与前两个音的频率有一定关系。合成音现象首先由意大利小提琴家**塔尔蒂尼**（G.Tartini，1692~1770）于1714年发现，故又称“塔尔蒂尼音”（Tartini Tone）。

人们在一些可以演奏双音的乐器上，可以很容易地验证合成音的存在。譬如在小提琴G弦和D弦上，用较强力度拉奏 c^1–e^1 大三度双音，会听到另有一个C音（大字组C）出现在 c^1–e^1 双音的下方，这个音就是合成音。

合成音的奇妙之处，在于它并不存在于声波中，但是我们的耳朵却能感受到。譬如，我们用仪器测量上面提到的例子，仪器只会显示 c^1–e^1 双音的存在，而检测不到C音的踪迹。这种现象说明，合成音现象完全由人的听觉系统本身所产生。关于合成音的发生机理，至今未有令人信服的解释。有一种理论假设，认为合成音是在人的内耳基底膜上产生的一种听觉神经信号[1]，但是尚未见到有关的实证报告。事实上，这种理论假说被证实的可能性微乎其微，因为要对耳蜗内的基底膜进行机能实验，除非有超乎想象力的安全保证和观察技术条件，否则哪一位志愿者愿意在自己正常的基底膜上进行合成音的实验呢？

[1] “Combination tone”参考：*Harvard Dictionary of Music*. Edited by Willi Apel. Belknap Press, 1969.

合成音又有“差音”（Differential Tones）和“合音”（Summation Tones）之分。所谓差音，是指由两个发声乐音频率相减得到的声音。需要注意的是，这里两个乐音相减的是频率数而不是音分数。例如，欲知道音程 c^1-g^1 的差音是哪个音，就用 g^1 的频率减去 c^1 的频率，即 392.45−261.63=130.59（赫兹）[1]，该频率值的音恰好为小字组 c。所谓合音，是指两个乐音频率相加得到的声音。再以音程 c^1-g^1 为例，二者频率值的和为 392.45+261.63=654.08（赫兹），该频率值的音为恰好 e^2。

差音和合音并非同时被发现，差音首先由前面提到的意大利小提琴家**塔尔蒂尼**在小提琴上发现，合音则在一百多年后由**亥姆霍兹**发现。从听觉角度讲，差音由于音量比较大，人耳容易感觉到，而合音的音量很小，人耳很难将其捕捉到，故人们在讲合成音的时候主要以差音为例。

对于差音，除了可以用较高音频率（f_2）减去较低音频率（f_1）产生的合成音外，人耳还可以听到较低音的高八度音（$2f_1$）减去较高音产生的合成音，即 $2f_1-f_2$。还以 c^1-g^1 为例，用 $2f_1$ 减去 f_2 之后所得到的频率值为 2×261.63−392.45=130.81（赫兹），恰好依然为小字组 c。

图5−2显示了在一个八度内 f_2-f_1 和 $2f_1-f_2$ 所得到的差音的情况。高音谱表标示的是发声的音程，低音谱表标示的是在听觉中产生的合成差音。实心符头是 f_2-f_1 产生的低音，空心符头是 $2f_1-f_2$ 产生的低音。

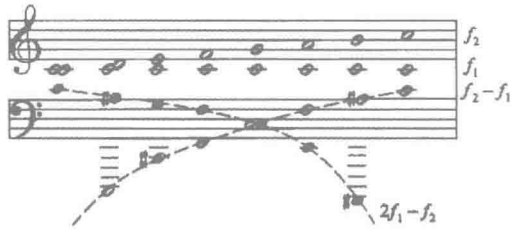
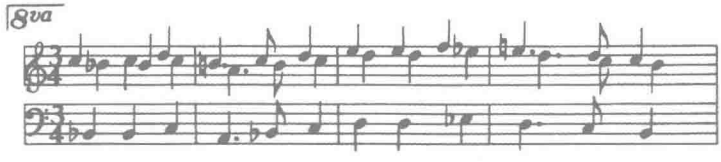


图 5-2　发声音与差音的关系

利用合成音原理，人们可以用两个很小的音管来产生很低的低音。美国音乐声学家**罗兴**经常用两个小管给学生演示合成音的效果（见谱例5−1）[2]。

谱例5−1



[1]　对合成音的计算，所有音程都以纯律为基准，不能用十二平均律。

[2]　Thomas D. Rossing . *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982: 135.

谱例5-1中，高音谱表是用小管吹奏的乐谱，低音谱表即是在听觉中产生的合成低音。在这段音乐中，上方两个声部构成平行大二度，而低音声部的合成音与上面的中音声部的旋律又构成2个八度的平行关系，因此其音响效果很奇特。

美籍德国作曲家亨德米特（P.Hindemith，1895~1963）曾经对合成音进行过深入研究，其和声学理论就是建立在合成音现象基础之上的[1]。

二、听觉泛音

"听觉泛音"（Aural Harmonics）也是一种存在于听觉中的非线性现象。当一个纯音以很大音量播放时，我们的听觉上会产生一系列高频泛音。这些泛音的频率与纯音的音高呈整数倍的关系：如果单频音为f，那么这些泛音的音高就为$2f$、$3f$、$4f$，等等。同合成音一样，这些泛音在声波中也并不存在（用仪器测不出来），只是在听觉系统可以感受到。

听觉泛音现象最早由弗莱舍（H.Fletcher）于1929年发现并提出[2]。根据声学家科莱克（T.D.Clack）于1977年的实验，一个音高为500赫兹，声强为70dB的单频音，其第2和第3个听觉泛音的强度分别为25dB和15dB[3]。

第四节 拍 音

"拍音"（Beats），是当两个高度比较接近的乐音同时发声时，产生的一种有规律的强弱变化的声音效果。严格讲，拍音不是"音"，而是人耳对声音强弱变化而产生的一种"抖动"的感觉，其"抖动"的频率为两音振动频率之差。假如一个音的频率为440赫兹，另一个音为442赫兹，当它们同时发声时，就会产生一个二"拍"的拍音。亥姆霍兹最早从纯音角度阐述了拍音产生的原理和听感变化规律，并在此基础上提出协和感产生机理。

需要注意的是，不是任何两个音在一起都会产生拍音，产生拍音必须达到以下条件：

1. 两个音在音高上相当接近（仅对纯音而言）。
2. 两个音在音强、音色和音长上比较接近。

拍音可以被仪器所测量，图5-3就是一个微有差

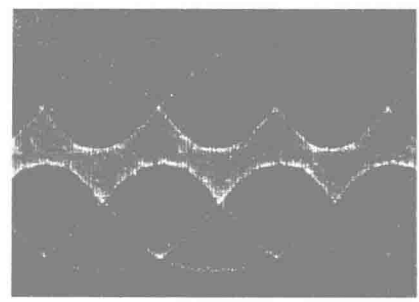


图 5-3 示波仪上显示的拍音波形图

[1] 亨德米特：《传统和声学》，罗忠镕译，人民音乐出版社1983年版。

[2] H. Fletcher. *Speech and Hearing*. New York: Van Nostrand,1929.

[3] Clack. *Growth of the Second and Third Aural Harmonics of 500 Hz*.Journal of the Acoustical Society of AME. 1977, 62:1060.

异的纯五度音程的波形图，两个波形叠加构成的峰与谷即是拍音之所在。

当两个纯音之间的拍音数在15个以内时，二者融为一体，人们听到的是一个抖动的声音。拍音数在15~30之间时，音响由融合效果逐渐变为生涩、刺耳。随着拍音数进一步增多，拍音效果变得平滑。当两个音的频率之比为15/16时，音响则变成两个可辨的单独乐音。图5-4显示了随拍音数量增多听感变化规律。

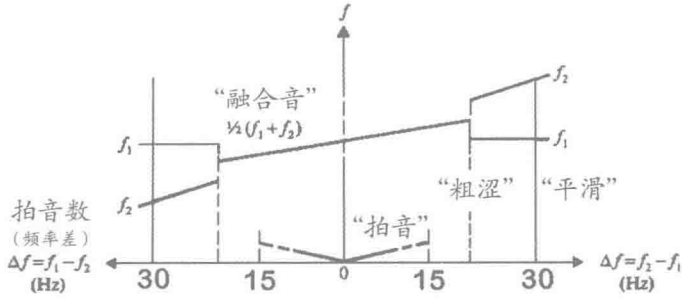


图 5-4　拍音与听感关系示意图

严格地讲，频率差在15赫兹以内的拍音不属于非线性范畴，因为它的振幅变化与我们的听觉感知基本上一致；但超过15赫兹以后，其振幅变化与我们感觉到的音响效果已无法对应，考虑其中已经有合成音存在，也就有非线性效应产生。

以上结论是基于纯音的实验，对复合音而言，拍音效果会因音色（频谱）不同而变化，总体上讲情况更加复杂。譬如，当两个相距超过半音的复合音同时发声时，虽然两个基音之间由于频率相差已超过半音而不会产生拍音，但二者的基音与泛音、泛音与泛音之间却有可能产生拍音，这要视二者之间的律制情况而定。譬如在钢琴上弹奏一个纯五度 d^1-a^1，如果是一个真正的纯五度（纯律），二个音之间不会产生拍音，因为二者的基音之间的音程关系已经超过半音，且基音与泛音、泛音与泛音之间的音高又完全重合，因而没有频率差存在。众所周知，钢琴采用十二平均律来调音，而平均律的纯五度略小于纯律，虽然二者基音之间由于超过了半音而不会产生拍音，但它们的泛音之间，如 d^1 上面的第2泛音（a^2）和 a^1 上面的第1泛音（a^2）却存在一个约为1赫兹的频率差[1]。钢琴调音师就是利用这一频率差产生的拍音来为钢琴调音；管风琴也是利用拍音来调音，同时为避免一根音管发出声音太"直"，人们还特意用两根音高微有差异的音管同时发声，通过二者产生的拍音让声音具有波动感。

在实际音乐演奏中会存在大量拍音。在管弦乐队中，木管和铜管声部的拍音最容易听到，弦乐声部由于本身利用"揉弦"技巧已经使声音产生波动，因而拍音效果不明显。

---

[1]　十二平均律 d^1 的第三泛音 a^2 的频率为 293.67×3= 881.01，a^1 的第二泛音 a^2 的频率为 440×2=880，二者之间的频率差为 881.01-880=1.01（赫兹），即为二音的拍音数。

有些拍音效果已经成为音乐风格的组成部分。譬如，演奏美国作曲家格什温（G.Gershwin，1898~1937）的作品，就必须注意要体现出特定的拍音效果，如《蓝色狂想曲》中的一些铜管乐段，常要用很明显的拍音来产生独特的刺激效果；再如中国广西民间音乐侗族大歌中经常出现小二度的声部进行，每当这个音程出现时，就伴随有奇异的拍音效果产生。

拍音与合成音都是在音与音结合时产生的一种声学现象，但需要注意二者之间的区别：前者是一种强弱变化的音响效果，本质上讲不是一个“音”；而后者是一个有音高属性的“音”，但这个音只存在于人的主观听觉之中，在声波中不存在。

第五节 与协和感有关的理论

协和感（Consonant Sense），是听觉对两个以上乐音同时或相继发声的一种感受，具有很强的主观性。一般情况下，人们常把“和谐”（Harmony）与“协和”（Consonance）混用，但二者在音乐声学层面有不同用法：前者用于描述不同纯音同时发声的效果，后者描述不同乐音（复合音）同时发声的效果。不同时代、不同民族、不同流派以及不同音乐教育程度等因素，都会对协和感产生影响。欧洲传统音乐理论将所有音程分为完全协和、不完全协和和不协和三种类型。音乐声学研究者和哲学家则希望找到影响协和感的客观规律。在此领域，曾出现三种较有影响的学说，即简单频率比说、拍音说和合成音说。

一、简单频率比说

该理论的核心是：音程的协和程度与音程频率比的复杂程度有关。频率比越简单，音程听起来越协和；频率比越复杂，音程听起来越不协和。根据这个原则，同度音程因其频率比为1:1，故听起来最为协和。八度音程的频率比为2:1，纯五度为3:2，纯四度为4:3，这些音程的频率比也比较简单，因而听起来比较协和。大三度的频率比为81:64（按五度相生律计，下同），小三度为32:27，这些音程的频率比较前面的音程复杂一些，听起来不十分协和，故名之“不完全协和”。小二度频率比为256:243，增四度为729:512，减五度为1024:729，很显然，这些音程的频率比较前述音程更为复杂，听起来也不协和，故称为“不协和音程”。

上述协和理论肇始自古希腊哲学家和数学家毕达哥拉斯，但是简单频率比说对有些音乐听觉感知现象则无法做出解释。例如，当我们用十二平均律演奏五度音程时，其频率比为433:289，相对来说比较复杂，但是我们听钢琴演奏的纯五度并没有感觉不协和；平均律的纯四度为303:227，听起来也很协和。这种现象表明，单纯的数学形式尚无法完整描述人的感觉问题。

二、拍音说

基于上述听觉事实的存在，亥姆霍兹从拍音角度提出了判别音程协和程度的标准。该

理论的核心是：无论什么音程，判断其协和与否主要看构成音程的乐音之间所包含拍音的数量。拍音说的立论依据源自心理物理学法则。

根据前面已介绍的拍音理论，若拍音数（即两音频率之差）在15拍以内，听觉会感到有抖动的拍音存在，此时，抖动的拍音会将两个乐音“融合”在一起，产生协和的感觉；拍音数超过15以后，拍音渐不容易分辨，音响效果也趋向粗涩，拍音数在30至40之间，生涩感达到极致；若两音的距离进一步扩大，人耳将听到两个独立存在的乐音。该理论后被指出仅适于解释500~1000赫兹频率范围的协和感，若超出此频段则无法解释。譬如，在100~200赫兹左右频段，拍音数达到22个时，声音已经很不协和，而在2000赫兹以上频段，包含20多个拍音数的音程听起来却比较协和。

20世纪中叶出现的“临界带宽”（Critical Bandwidth）理论，可视为对拍音说的补充。临界带宽是指：以某一频率为中心向外延伸而构成的一定宽度的频率带，用赫兹数来标示。该理论的要点是：声音本身所具有的性质与其所在频段及频带宽度有关，在临界带宽之内，声音是一种性质；而一旦超出临界带宽，声音性质就会发生显著变化。临界带宽理论是基于对人耳主观听觉实验数据的统计，可用于解释人耳在音高识别、响度识别、协和感等方面体现的规律。

关于临界带宽对协和感的影响，普劳姆普（Plomp）和莱威尔特（Levelt）二人于1965年提出了如下理论：

1. 无论在哪个频段，只要两个纯音构成的音程超过临界带宽，声音就协和，反之不协和。

2. 当两个纯音构成的音程大小等于临界带宽1/4时，声音最不协和[1]。

表5-1给出了不同频点临界带宽以及最不协和的1/4带宽值。为方便音乐工作者查看，表中增加了音分值，由相应的带宽频率值换算而成。

表 5-1　不同频点临界带宽以及最不协和的 1/4 带宽值

中心频率（Hz）	临界带宽值（Hz）	音分值	1/4 带宽值（Hz）	音分值
100	90	1111	22.5	351
200	90	643	22.5	185
500	110	344	27.5	93
1000	150	242	37.5	64
2000	280	227	70	60
5000	700	227	175	60
10000	1200	196	300	51

[1] “Consonance”参考：*New Grove Dictionary of Music and Musicions*. Edited by Sadie. S.London: Mcmillam Press, 1980.

从表5-1看出，随着频率由低至高，临界带宽值虽然在增加，但音分值却在逐渐减小，即音程在变窄。譬如，在100赫兹（相当于偏高的大字组G）这个音区，临界带宽音分数为1111，接近一个大七度；而最不协和音程为351音分，接近一个中立三度（介于大、小三度之间）。这表明，在这个音区范围，从小二度至大七度都属于不协和音程，而最不协和音程是中立三度。在500赫兹（偏高的小字1组B），最不协和音程为93音分，接近一个小二度；而到了2000赫兹（偏高的小字3组B），最不协和音程仅为60音分，比平均律小二度还窄40音分。由此可知，音程的协和性随音区高低而变化，低音区音程宽，高音区音程窄。图5-5将临界带宽与钢琴键盘相对应，可更直观看出在不同音域临界带宽变化。

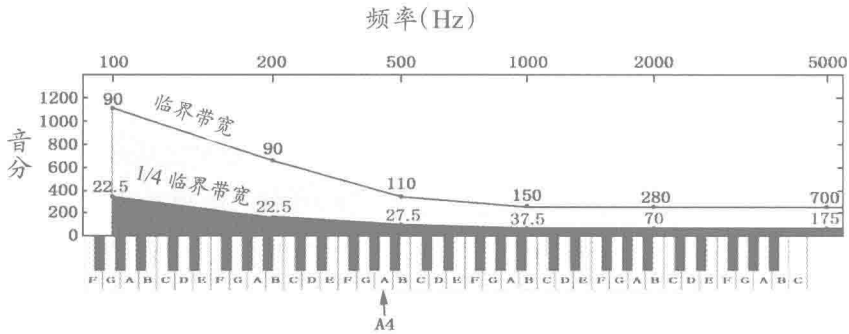


图 5-5　临界带宽与钢琴键盘对应变化

上述规律恰好可以解释亥姆霍兹理论：在500~1000赫兹音区中，30~40 赫兹的拍音听起来非常粗糙，因为已接近该频段临界带宽的1/4（27.5~37.5赫兹）。

临界带宽概念还可以解释复合音音程的协和感。表5-2列举三个音程中包含不良拍音的数量：纯五度音程，前5个泛音中只有1个不良拍音组合；小三度音程，有3个不良拍音组合；大二度中则有包括基音在内的5个不良拍音。由此可以看出，不良拍音数越少，协和感越强。

表 5-2　上述三个音程中包含的拍音及频率示意表

音程	纯五度			小三度			大二度		
	c^1		g^1	c^1		$^{\flat}e^1$	c^1		d^1
基音频率	262		392.5	262		314	262	X	294
泛音频率	523			523	X	628	523	X	589
	785	=	785	785			785	X	883
	1047	X	1177	1047	X	942	1047	X	1177
泛音频率	1308			1308	X	1256	1308		
	1570	=	1570	1570	=	1570	1570	X	1472

注：符号“X”表示会引起不良拍音的音程

基于拍音理论，再来分析十二平均律纯五度的情况，由于平均律纯五度音程比纯律纯五度仅仅小0.46赫兹（纯律 g^1 频率为392.45赫兹，平均律为391.99赫兹），其泛音中所含不良拍音组合与纯律基本相同，因此二者在协和感方面也基本相同。对于小三度和大二度来说，情况也类似。

拍音说还可以解释其它一些简单频率比说中存在的漏洞。譬如，所有不完全协和音程一旦到了低音区，听起来就成了不协和音程，以 $c^1-{}^{\flat}e^1$ 小三度为例，该音程在中音区听起来属于不完全协和音程，但若在钢琴上降低一个八度弹奏，其听感明显变得粗涩，这是因为降低音区后，临界带宽变宽导致音程中不良拍音数量的增加。

三、合成音说

合成音说的立论依据源于关于合成音的听觉实验结果，其代表人物是亨德米特。按照该理论，当两个以上乐音结合时，产生的合成音如果与原音构成协和的关系，这个音程听起来就具有协和感，否则不协和。

按本章第四节所述，合成音学说中具有协和感的音程与上述两种理论在许多方面颇具一致性，如同度、八度、纯五度、纯四度音程所产生的合成音（差音），不是与原音重复，就是与原音构成八度关系，而大三度、大六度音程所产生的合成音没有与原音构成重复或八度关系，但基本是协和关系；而大二度和大七度音程所产生合成音，与原音都构成不协和关系（详见第三节“合成音”部分）。

以上三种理论假说中，简单频率比说、拍音说理论由于出现的历史较早，故被较多音乐理论所采用；合成音说由于完全依赖听觉心理实验，极易受个体差异因素的影响，且无法解释在较低声音强度下合成音缺失时人们的协和感知机理，所以只被少数学者引用。与此同时，临界带宽理论近年来则得到越来越多学者认同。

20世纪后期，在对协和的认知程度上，提出了“感官协和”（Sensory Consonance）和“音乐协和”（Musical Consonance）[1] 的概念。前者是指孤立的声音直接给予感官愉悦与不愉悦的印象；后者指声音在音乐进行中给听者带来的愉悦与不愉悦感，除了依靠感官协和印象之外，它还与音乐经验和训练经历有关。在对协和感作跨文化调查中发现，八度协和认知是一个世界普遍现象。此外，在西方、印度、中国以及波斯阿拉伯音乐体系中，协和感的认知亦符合简单频率比理论，即纯五度3:2、纯四度4:3、大三度5:4。

总之，在影响协和感的客观因素问题上，尽管人们从数学、物理学和听觉心理学角度做了很多有意义的探讨，但由于这个问题掺杂较多非线性因素，至今尚未出现完整、系统的理论解释。

---

[1] P.Boomsliter and W.Creel. “The Long Pattern Hypothesis in Harmony and Hearing”. JMT, 1961, 2:31. J.P. Van de Geer, W. Levelt and R. Plomp.“The Connotation of Musical Consonance”. Acta Psychologia, 1962:308~319.

章后思考与讨论题

1. 从建立听觉的时间角度看，人耳更易于识别哪个音区的声音？为什么？

2. 从听觉系统工作原理角度解释为何人耳察觉乐音比察觉噪音更快一些？

3. 根据实验结果，人耳对音高感知的建立至少需要几个完整的振动周期？

4. 在对声音四种属性（音高、音色、音强和音长）的分辨能力上，人耳对哪种属性的识别时间最短？哪种属性的识别时间最长？

5. 何谓“音乐的时间”？它与“个体时间”有何联系？

6. 何谓“合成音”？你自己能否通过实验感知合成音？

7. 何谓“听觉泛音”？你是否感知过这种音响现象？

8. 何谓“拍音”？请举例说明它在音乐实践中的具体作用。

9. 根据前人研究成果，哪些客观因素会影响我们的协和感？你认为最为关键的是哪个因素？

第六章　音乐声的物理基础

第一节　振　　动

当物体围绕一个位置作往返运动，即称为“振动”（Vibration）。根据这个定义，我们的宇宙无时无刻不在发生着振动，上至天文，下至地理；大至星球的运行，小至基本粒子的碰撞；轻微若鸿毛抖动，重要如心脏跳动，无不与振动有关。因此我们说，振动是宇宙中一种永恒的运动方式。振动也是产生一切声音——包括音乐声的物质基础。

大千世界虽然存在多种多样的振动形式，但只有符合人类听觉条件的振动才能构成音乐声赖以存在的物质基础，本节所要讨论的就是这种性质的振动。

首先了解一些振动的基本知识。

一、周期性振动与非周期性振动

从总的振动形式上讲，振动分周期性振动和非周期性振动两大类。每经过一定时间，物体振动形态与起始时的状况完全一样，即物体的位置、方向、速率、速度的变化率等物理量都一致，那么这种振动就叫作周期振动，反之为非周期振动。弦乐器琴弦和手风琴簧片的振动，都属于周期性振动；而风吹树叶产生的振动，弦乐器拉奏或拨奏时琴弓或指甲与琴弦刚刚接触的一刹那的振动则属于非周期性振动。音乐中既有周期性振动，也有非周期性振动。

二、简谐振动和复杂振动

自然界中各种振动形式千差万别，为便于开展研究，人们常以一种最简单的振动形式作为振动的基本模式，称之为“简谐振动”（Harmonic Vibration）。它是一种周期性、没有衰减、周而复始的正弦或余弦振动。如果我们把这种振动的物理量设为 X，则这个物理量可以用下列公式来表示：

$X=A\sin(\omega t+\psi 0)$ 或：$X=A\cos(\omega t+\psi 0)$

其中，A 称为“振幅”（Amplitude），代表振动幅度的大小；ψ 叫作“相位”（Phase），用来表示各时刻简谐振动的运动状态；ω 称为角频率，表示角度变化的频率；t 叫作“周期”（Period）。根据公式，每经历一个周期 t 的时间，简谐振动就会回复到原来的状态。我们身边也存在着简谐振动，如交流电中的正弦波动，电子发声器产生纯音信号的振动等。

公式中振幅、周期和相位是简谐振动的三要素。其中，振幅与音强变化有关，周期与音高变化有关，相位与声像变化有关。

自然界中大量振动形式包括乐器的振动，都要比简谐振动复杂，如何分析这些复杂振动成为研究的难题。根据法国数学家傅里叶(Joseph Fourier，1768~1830)提出的重要理论，任何一个周期性振动，无论其振动模式多么复杂，都可以分解为一系列不同振幅、不同频率和不同相位的简谐振动。例如，一个方形波就可以视为几个不同振动频率的正弦波的叠加。人们称这种理论为“傅里叶变换”(Fourier Transmission)，将采用这一理论分析复杂振动的方法称为“傅里叶分析”(Fourier Analysis)，这也是后来频谱分析理论的基本依据。

人们还利用这一理论，将不同频率、振幅和相位的简谐振动合成为复杂的振动，用以制造出各种各样的乐音。图6-1是用三个不同频率的正弦波合成一个方波的示意图：

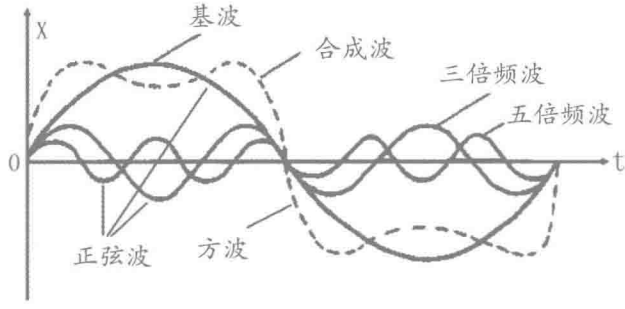


图 6-1 用正弦波合成方形波示意图

三、阻尼振动

振动物体的振幅随着时间延续而衰减的振动叫“阻尼振动”(Damping Vibration)。在我们的地球上，如果没有外界给予能量补充，所有的振动都是要衰减的，自然界中存在的振动大多是阻尼振动。

阻尼振动主要受到材料性状、几何形状和外部阻力的影响。例如中国古代编钟在制造过程中就充分考虑到了前两方面的因素，钢琴的止音装置主要是运用了材料性状和外部阻力的因素。阻尼振动中有一个很重要的概念，即阻尼振动的品质因数Q值，它表示一个周期里相对能量损失的倒数的2π倍，即：

$$Q=2\pi\times\frac{\text{系统贮存的能量}}{\text{一个周期内损耗的能量}}$$

Q值与振动物体衰减的速度有关，振动衰减得越快，Q值越小。譬如，手风琴簧片一旦没有空气压力支持，衰减速度很快，其振动的Q值就很小；而钢琴琴弦的振动，在踩下延音踏板的情况下，其振动衰减得较慢，因而振动Q值较大。

对音乐而言，阻尼振动是不可或缺的。例如，中国古代乐工为了避免编钟延时太长，就在制钟的原材料中加入一定比例的铅，用以降低钟体本身的 Q 值，从而保证编钟演奏起来不至于产生太多的余音干扰。但是，对某些乐器来说，又希望阻尼系数越小越好。例如，对制作提琴音箱的木材来说，制作者总是以 Q 值高或者说阻尼振动系数小的材料为上品，因为用这样的材料制作出来的提琴，发音更灵敏、洪亮。

有关乐器声音品质的问题将在第九章专门探讨。

四、振动频率

物体每秒钟振动的次数称为“频率”（Frequency）。它是与乐音高度直接联系的一个物理量。单位叫赫兹（Hertz），简称赫，符号为 Hz。常用单位还有千赫（KHz）、兆赫（MHz）。普通钢琴最低的一根弦（A_2）的振动频率是27.5赫兹（基频），最高（c^5）是4186赫兹，中波收音机接收无线电波的波段为550千赫~1760千赫，调频收音机为50兆赫~110兆赫，等等。人耳只能感受20~20000赫兹的机械波，尽管我们生活的空间充满了各种形式的波动，但由于绝大多数都超出了我们听觉感知的范围，因此我们可以“充耳不闻”。

频率（f）与前面出现的周期（t）互为倒数关系。用公式表示为：

$f=1/t$

在现代音乐声学教科书中，频率比周期用得更多一些。

五、固有频率

任何物体基于不同的材质、结构、体积等因素，都有其自身的振动频率，该频率称为物体的“固有频率”（Natural frequency）。乐器可以被视为由不同物体组合而成的复合物体，具有多种不同的固有频率。例如，二胡是由音箱、振膜、琴马、琴杆、琴弦、弦轴和琴弓等部件组合而成，因此二胡的固有频率是多种多样的；人体也可被视为具有不同固有频率的“乐器”，发声器官是声带，而头腔、口腔、鼻腔、胸腔等腔体则具有不同的固有频率。

第二节　共　　振

当周期性的外力作用在振动系统时，物体会产生受迫振动，这个外力叫作策动力。譬如，琴弓施加在琴弦上的摩擦力，就是策动力。当外部策动力的频率与物体固有频率非常接近或完全相等时，振幅会迅速达到其可能的最大值，这种现象称为“共振”（Resonance）。除了频率相同这个条件之外，产生共振还需要策动力不断给振动系统补充能量。这就像我们摆动秋千一样，如果每次摆动的频率和方向相同，且每次施加一定的力，秋千就会越荡越高，但只要缺少其中一个条件，秋千就无法荡起来。

由共振现象产生的声音变化称为“共鸣”。在日常生活和音乐演奏中，共鸣现象无处不在。其中大多数属于良性共振，如各种乐器的共鸣箱、木琴的共振管和人声的共鸣腔，它们的作用就是将发声源的微弱振动加以共振放大。如果没有这些共鸣装置，大多数乐器都只能发出极为微弱的音响。乐器上有时也存在人们无法控制的不良共振，这些不良共振往往导致乐器演奏中出现“狼音”，即一种粗涩声响的出现。

古人很早就发现了共鸣现象，并利用它解决了许多问题。举例说明，中国9世纪有位叫南卓的人在其所著《羯鼓录》中就记述了这样一个故事：故事的主人公太常丞宋沇(yǎn)耳朵极为灵敏。一日，他来到一个名叫光宅寺的寺院，忽闻院内佛塔上传来风铎[1]的声音，并听出其中有一个铎的声音很独特。光宅寺的僧人告诉他，这个风铎常常“无风自摇”，即无风而响。他立即告诉僧人其中的缘故，因为有人在光宅寺祠堂内敲钟，风铎便应声而振。为了进一步证实他的说法，在经寺僧允许后，他差人将该风铎从塔上取下，回到当时的皇家乐府机构——太常，并让乐工和寺僧观察他所进行的共振实验。在约定好的时间，一边让人敲击寺钟，一边让人观察该风铎是否应声而鸣。最后的实验结果证实了他的预言。[2]

不了解音乐声学的人往往会产生误解，以为共鸣是一种音量放大现象，其实共鸣体本身并不具放大音量功能，它的作用是将来自振动体的能量通过共鸣体迅速地向四周辐射扩散，使之骤然达到能量限度内的最大值，其能量本身并没有增加。换言之，共鸣体本身不能产生能量，但却可以将来自振源的能量“充分发挥”，因而让人们产生“声音变大”的感觉。

19世纪，德国科学家亥姆霍兹开始利用专门工具来研究共振问题，并以此探索复合音中的泛音成份。亥姆霍兹发明的器具构造如图6-2所示，是一个带有出音口的球状玻璃瓶。对复合音进行测量时，将共鸣器的出口端对准耳朵，共鸣器指向声源，当声源中的某一泛音频率与共鸣器的固有频率相同时，共鸣器就会产生共鸣，导致声音突然变大。人们由此可知所测量的声音中肯定含有与共鸣器共振频率相一致的泛音成份。通过更换大小不同的玻璃球体，就可以检测到不同的共鸣频率成份。

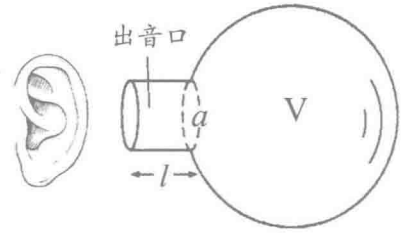


图 6-2 亥姆霍兹共鸣器示意图

共鸣器的共振频率(f)可以通过下面的公式算出：

$$f = v/2\pi\sqrt{\frac{a}{Vl}}$$

该公式中，v 是声速，V 是共鸣器的体积，a 和 l 是管口的面积和长度。

由于该器具由亥姆霍兹本人发明，故称为“亥姆霍兹共鸣器”(Helmholtz resonator)。在

[1] 悬挂在佛塔上的响器，铎状，风吹可发声。

[2] 唐·南卓《羯鼓录》，中华书局“中国文学参考资料丛书”，1958年出版，第11页。

现代频谱分析仪发明之前，人们常用它来测听复合音中的泛音成份。有兴趣的读者也可以用类似的器皿（如暖水瓶的瓶胆）做一番实验。

第三节　介　　质

“介质”（Media），在声学中是指所有能够传递机械振动的物质。机械振动是通过介质质点的振动带动相邻的介质质点振动，由此及彼加以传递的。没有介质，振动就无法传播。

在自然界中，介质无处不在。气体、流体和固体都可以充当传导机械振动的介质。空气，是自然界中最常碰到的介质。有条件的读者可以做一个实验：在一个密封的容器里放一只电铃，使之发声，然后逐渐抽掉里面空气，随着空气逐渐抽空，你会听到铃声逐渐变弱，以致最后几乎听不见。这说明没有空气或其它物质作为介质，振动无法到达我们的鼓膜。有的家庭使用中空玻璃作门窗，能起到隔绝外界噪音作用，也基于同样道理。

“声速”（Velocity of sound），即声波传播的速度。在空气中声速与介质温度有关，其经验公式为：

$$v = (331.4+0.6c)\text{米/秒}\ (c = \text{摄氏温度}(℃))$$

假如气温为15℃，则：

$$v = (331.4+0.6\times 15)\text{米/秒} = 340.4\text{米/秒}$$

在不作精确要求时，可以把空气中的声速按340米/秒来计算。这个物理量在音乐声学计算中经常出现。

在不同介质中，机械振动的传导速度各不相同。表6-1是在一些常见介质中振动传导的速度：

表 6-1　常见介质中的声速

介　质	速度（米/秒）
空气（15℃）	340
水蒸气（100℃）	405
淡水（15℃）	1481
海水（15℃）	1500
玻璃	3100
松木	3500
铝棒	5150
钢棒	5200

由表6-1可以看出，振动在普通空气中传导的速度最慢，约为340米/秒；在钢棒中传导

的速度最快，约为5200米/秒。这说明介质传递振动的速度与介质的材料质地、密度有关——质地越硬，密度越大，振动传导的速度越快。正是由于这个道理，有经验的人常常将耳朵贴在钢轨上，以探知火车是否到来，因为钢轨传导振动的速度比空气快，这样做可以比从空气中听到火车声音提前许多。

第四节　声波与波长

“波”（Wave）是信息的载体，我们每天都生活在“波海”之中：通过语言的声波进行人际交流，通过乐器产生的声波享受音乐艺术，通过电磁波获取电话、电视信息，通过光波了解这个世界。可以这样说，波是人类除了阳光、空气和食品以外第四种不可缺少的物质。

物理学将“波”定义为“以特定形式传播的物理量或物理量的扰动”。具体来讲，波是振动状态，包括振动方向、振动相位和振动能量的传播。

从形式上分类，所有的波又可分为机械波和电磁波两大类。我们常说的“声波”（Sound wave），则属于一种特定形式的机械波。通常情况下，人类听觉系统只能够感受到20~20000赫兹的声波，因此称该范围内的波为“可听声波”，低于此范围的声波称“次声波”（Infrasound wave），高于此范围的声波称“超声波”（Ultrasonic wave）。音乐演奏所产生的波都属于可听声波范围。

按照传播方向，波又可分为横波（Transverse wave）和纵波（Longitudinal wave）两种。

“横波”，是指波的传播方向与介质或物理量振动方向相垂直。例如，向一个方向抖动绳子，如图6-3所示，波朝X方向前行进，而绳子的质点在Y方向上下运动。

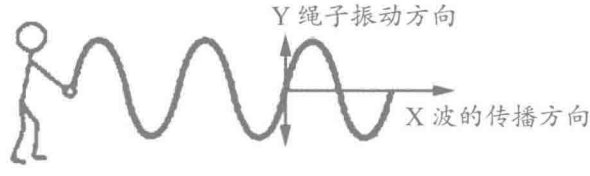


图 6-3　横波传播示意图

传送无线电、电视和手机信号的电磁波就属于横波，光波是电磁波的一种，因而也是横波。

“纵波”，是指介质或物理量的振动方向与波的传播方向相同。如图6-4所示：当音叉振动时，会带动空气介质前后振动，产生空气压缩，由此产生的声波向前传播，与空气介质振动方向相一致。

由于这种波在传播过程中会产生介质的疏密变化，因此纵波又称“疏密波”或“压缩波”。

声波在空气或液体中传导皆属于纵波，我们的耳朵听到的声音就是空气的压缩和舒张刺激耳膜而产生的。声波在固体中传导则属于横波，地

图 6-4　纵波传播示意图

震波就是在地壳中传播的横波，只是其频率往往低于我们可闻范围，属于次声波。

就声波而言，纵波传播的速度比横波要快一些。

无论横波还是纵波，每个波经过一个周期以后，振动形态会重复，而波传播了一定距离，这个距离就称为“波长”（Wave length）。

如图6-5所示，当我们手执绳子的一端，另一端被固定，以匀速抖动绳子，就会出现图中的波形，两个波峰之间的距离，就是波长，用希腊字母 λ 表示。波长是个距离的概念，通常使用的计量单位是“米”。

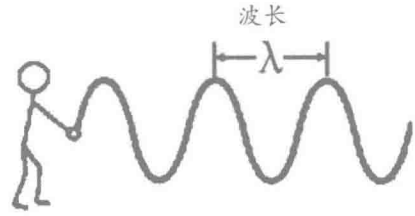


图 6-5　波长示意图

如果我们以较快的频率抖动绳子，波形就会变密，波长也就随之缩短。这个实验告诉我们：波长与频率成反比关系。

前面已经介绍过，频率与音的高度成正比，由此我们可以推出：波长与音高成反比关系，用公式表示为：

$\lambda=v/f$　（λ 表示波长，v 表示声速，f 表示频率）

由于常温下声速是一个已知的量，即340米 / 秒，那么借助上面的公式，我们可以通过声波频率求出其波长，或通过波长求出其频率。例如，目前国际标准音 a^1 的频率为440赫兹，已知常温下声速为340米 / 秒，那么标准音 a^1 的波长 =340/440 ≈ 0.8（米）。

在声学理论中，将某一个时刻同相位的振波到达的点的集合叫作“波前”（Wave front），又称“波面”或“波阵面”。波阵面是平面的波叫“平面波”，波阵面是球面的波叫作“球面波”。譬如，当一把二胡演奏的时候，直接推动空气振动的振源只是1平方分米左右的皮膜，因而可以视其为一个“点声源”，声波由此出发向四面八方扩散，产生的波阵面就是球面波；而在剧场中，有的音箱矩阵十分庞大，可以视为平面振源，其发出的声波就属于平面波。

第五节　声波传播的基本性质

所有声波在传播过程中都具有以下性质：

一、叠加性

声波的叠加性是指：如果有两组以上的声波在一个共存空间内相遇，总的声波能量等于各个声波能量的矢量和。例如，两把二胡在一个房间内演奏同一首乐曲，其声能等于每把二胡声能的矢量和。矢量是指有方向的量，对声波而言，主要与声波的相位有关。假若两组相位相同的声波在同一空间内叠加，其声能就会增加，人们就会感觉声音增强；若相位正好相反的声波叠加，其矢量正负相抵，声能就会减弱，甚至全无。有科学家正利用这一原理进行减

除环境中不良噪音的研究。

二、干涉性

声波的干涉性是指：当两组振动频率稍微不同的声波，在同一空间叠加时产生的一种振幅瞬时加强和减弱的现象。在我们听觉中，会产生声音忽大忽小的感觉，这就是前面已经提到过的拍音。

拍音实际上不是音，而是一种由强弱变化造成的抖动感。其抖动频率与两种声波的频率有关，即拍音数 $f_b=f_1-f_2$ 。比如，当频率分别为440赫兹和441赫兹的两组声波在同一空间相遇，其干涉产生的拍音数为441−440=1（拍）。

法国物理学家索维尔（Sauveur，1653~1716）在1700年用两根管长比为25:24的风琴管做实验，根据其拍频为4，得知高音管的基频是100赫兹，低音的基频是96赫兹。

三、反射性

声波在传播过程中遇到刚性界面时，会产生反射，这一点与光波的反射一样。声波反射时，其入射线与反射线在反射面法线的两侧，且入射线、反射线和法线在同一个平面内，入射角等于反射角。这就是声波的反射定律（Reflection）。如图6-6所示，入射角为入射线与反射面法线之间的夹角∠1，反射角为反射线与反射面法线之间的夹角∠2，根据反射定律，∠1=∠2。

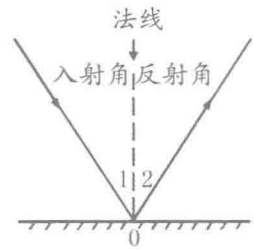


图 6-6 声波反射示意图

在音乐实践中，声波的反射问题是要着重考虑的。音乐厅、剧院、礼堂或听音室的设计中，都要考虑四壁、天花板甚至台阶等处的声反射问题。声波反射效果与房间的大小，结构形式，长、宽、高比例和材料及表面的粗糙程度等因素有关。一般情况下，音乐厅舞台上都要安装反射板，以便把乐队向上发出的声波反射到听众席。有关声波反射在音乐中的应用，在第十五章还将介绍。

四、折射性

声波从一种介质传播到另外一种介质时，会发生折射现象。这是由于声波在两种介质内的传播速度不同所致。与反射情况相同，入射线与折射线在折射面法线的两侧，而且入射线、折射线与折射面的法线在一平面内。入射角、折射角以及在介质里的传播速度可以用下列公式说明：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{v_1}{v_2}$$

其中 i_1 是入射角，即入射线与法线之间的夹角；i_2 是折射角，即折射线与法线之间的夹角；

v_1是入射波在介质1中的波速；v_2是折射波在介质2中的波速(如图6-7所示)。

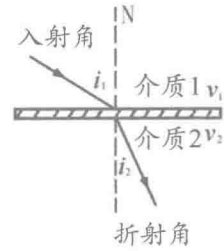


图 6-7　声波折射示意图

有些情况下，尽管介质相同，但由于介质的密度、压强、温度或声阻不同，也应看作是不同的介质，声波在其中传播时速度会发生变化，从而声波也会产生折射。在炎热的夏日中午，如果晴朗无风，我们会发现原野寂静无声。这是因为地面空气温度高，而高空的空气温度低，两种不同温度的空气就好比两种介质，声波在其中传播时发生折射，向上弯曲，导致地面上听不到声波。

声波折射会导致音高的变化。音乐中利用折射原理的例子有中国旅美作曲家谭盾的作品《永恒的水》协奏曲(1999年6月3日在美国林肯中心首演)：乐手在敲击锣的过程中将锣放置水中，铜锣的音高和音色都发生了变化。这是因为锣的振动波在从一种介质到另一种介质的转换过程中(空气—水—空气)，声波发生了折射。这时，虽然振动波长没有发生变化(因为铜锣本身的物理性状没有改变)，但声速在介质的变化中发生了改变，根据公式：频率 = 声速 / 波长，锣的振动频率也就发生了变化。至于音色的变化，则是由于介质密度的变化改变了振动物体的阻尼系数，使锣的泛音成份(即频谱)发生了改变所致。

五、衍射性

声波在传播过程中遇到有边界刚性界面时，还会发生衍射，又称绕射，即波在传播中遇到障碍物后，绕过障碍物的边缘，在障碍物背后形成衍射的现象(见图6-8)。

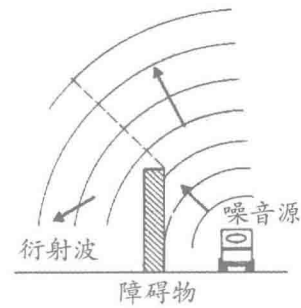


图 6-8　声波衍射示意图

六、独立传播性

由两个波源发出的波，在空间汇合后，还继续沿着各自原来的方向传播，这就是声波的独立传播定律。这就像两盏探照灯的光线不时在空中交汇，而后仍沿着各自方向照射；两个波源的水波叠加时，会荡起粼粼波浪，相遇后也会沿着各自的方向前进。管弦乐队演奏时，虽然各种乐器发出的声波在空间已交汇在一起，但你仍可分清它们来自舞台何方，亦出于此道理。

第六节 驻波与多普勒效应

在声波传播时，当振动频率、振幅和传播速度相同而传播方向相反的两列波叠加时，就会产生驻波(Standing wave)。例如，当水波碰到岸边反射回来时，前进波和反射波的叠合就会产生驻波。在闭管乐器中，空气柱到达管的底端后便反射回来，与原来的空气柱重合，也会产生驻波。驻波形成时，空间各处的介质点或物理量只在原位置附近作振动，振幅最大处叫波腹，振幅最小处即看上去静止不动处叫波节。相邻两个波节或波腹之间的距离是半个波长(如图6-9所示)。

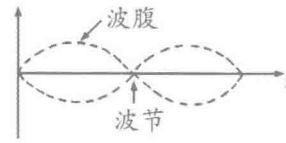


图 6-9 驻波示意图

利用弦上的驻波或管内形成的空气柱的驻波可以测定声波的频率。例如把耳朵放在空的广口瓶或暖瓶上方倾听，可以听到嗡嗡的响声，这是空气在瓶内形成声驻波，瓶底是波节，瓶口外是波腹，瓶的深度即“管长”，是四分之一波长。当我们往暖瓶灌开水时，随着水面的上升，可以听到声音逐渐升高，这是空气在暖瓶内从水面到瓶口处形成了驻波，并在瓶口外形成波腹，随着水面的上升，水面到瓶口的距离即“管长”不断变短，形成的驻波的频率也不断升高的缘故。

一、多普勒效应

1842年，奥地利物理学家多普勒(C.Doppler，1803~1853)首先从理论上解释了这样一种现象：当我们乘坐火车旅行时，听到对面疾驶而来的火车鸣笛声，先是升高，然后又随车子的驶过而降低。其原理是这样的：我们的耳朵作为声音信号的接收器，与信号源(汽笛声)做相向运动(即相互靠近)时，接收到的信号波长会在瞬间变短。因为波长与频率成反比关系，波长变短，频率就会升高，那么我们就会感觉声音在变高；当我们与信号源作反向运动(即相互远离)时，波长在瞬间变长，所以就会感到声音变低。人们后来将此现象称为“多普勒效应”(Doppler effect)。

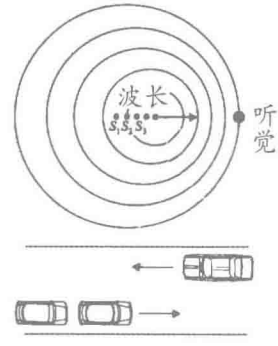


图 6-10 “多普勒效应”示意图

多普勒效应原理被大量应用在天文观测和医疗诊断中。如从地球上观察一颗恒星发来的光，如果地球和恒星相互退行，则观测到光线向光谱的红端移动(频率变低)；如果地球与恒星相互靠近，则观测到光线向光谱的紫端移动(频率变高)。

虽然人们早就知道多普勒效应会使声音发生改变，但从未有人将其应用到音乐当中。直

到20世纪90年代，一位美国的打击乐手巧妙地将多普勒效应融入音乐之中，他就是来自纽约的**大卫·科辛**(David Cossin)。笔者2001年秋天在北京聆听中国旅美作曲家**谭盾**的《卧虎藏龙》协奏曲时，曾有幸观看到了他的精彩演出。

大卫是利用一根废纸筒制作的电声打击乐器来实现多普勒效应的。乐器的构造如下图所示：

在一个长约1米的圆纸筒内安置一个无线话筒，话筒与一个功率放大器和音箱构成无线连接。演奏时，乐手手持纸筒，用各种手法敲击纸筒，纸筒内的话筒将纸筒受振效果通过电声扩大后传播出去，此时纸筒相当于一件简单、但效果丰富的打击乐器。精彩的是，当**大卫**手持纸筒迅速靠近音箱并随后快速离开时，话筒与音箱(相当于振源)之间的波长在瞬间变短然后又变长，这时人们就听到了一种奇妙的音高变化效果，通过控制纸筒的移动速度和距离，乐手甚至可以任意改变音的高度。这种音效与变化多端的节奏溶合在一起，构成了作品中一个闪光点。

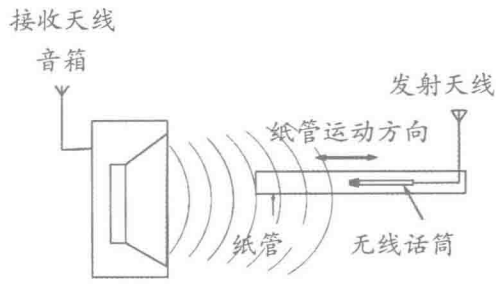


图 6-11　多普勒效应乐器构造示意图

章后思考与讨论题

1. 何谓“简谐振动”？如何用公式来表示？
2. 简谐振动赖以存在的三要素是什么？它们分别与音乐音响中的哪些要素相对应？
3. 振动频率与振动周期有何区别？二者之间的呈何种关系？
4. 发生共振的条件有哪些？共振与共鸣是一回事吗？
5. 如何计算“亥姆霍兹共鸣器”的共振频率？你能否计算出一个暖水瓶的共振频率？
6. 介质传递振动的速度与介质的材料质地和密度呈何种关系？
7. “横波”与“纵波”的区别何在？音乐中的波属于哪种波？
8. 波长与频率二者呈何种关系？如何用公式来表达？
9. 声波传播的基本性质有哪些？
10. 出现“多普勒效应”需要哪些条件？能否将其应用于音乐实践？

第七章　音乐声的基础知识

第一节　音乐声的定义

“音乐声”(Musical sound),是指“音乐中包含的所有音响材料”。其中既有乐音,也有噪音,还有乐音性噪音。应当注意把它与“乐音”(Tone)区别开来,因为音乐声所指的范围要远远大于乐音,另外,也需要将其与普通声音的概念加以区别。在本书开始的序言中,我们已经就声音的定义问题进行了讨论,并得出“声音是人类听觉系统对一定频率范围内振波的感受”。很明显,“声音”的定义比“音乐声”包含的内容范围更宽泛。

音乐的发展受到来自社会文化和技术条件的制约,其音响特征和风格演绎也总是随着历史发展而不断变化,这些影响给人们对音乐声的理解带来一些困难。虽然从字面上看,音乐声的定义本身是稳定的(“音乐中包含的所有音响材料”),但其包含的实质内容却会因音乐的发展而不断变化,总的趋势是内容愈加丰富多彩。譬如,中国古人将音乐声概括为“八音”,即“金、石、土、革、丝、木、匏、竹”,而现代人则已经把“电(声)”看作音乐声中不可缺少的组成部分。又如,欧洲古典乐派认为人声和乐器声已经是音乐声的全部,但到了法国现代作曲家梅西安(O.Messian,1908~1992)那里,各种各样的鸟鸣声也成为音乐的组成部分;及至他的学生施托克豪森(K.Stokhausen,1928~2007),又将音乐声的范围扩大到电子声(作品《麦克风Ⅰ》)和人的朗诵声(作品《音准》);而到了美国作曲家凯奇(John Cage,1912~1992),随机噪声也成为音乐的素材(其作品《4′33″》完全没有演奏,观众听到的只是自己发出的随机噪声而已)。时至今日,音乐声的概念已经几乎扩展至宇宙中所有的声音成分,音乐声与非音乐声的概念已经融为一体。

本书中所介绍的音乐声的范围,仍以常规乐器发出的声音(包括人声)为主,旁及电子声和噪声。

第二节　纯音与复合音

从振动角度,可以把所有音乐声分为“纯音”和“复合音”两大类。

“纯音”(Pure tone),是指由单一振动频率成份构成的声音。“复合音”(Complex tone),是指由一种以上振动频率成份构成的声音。自然界中纯音比较少见,因为通常情况下物体在

振动时，除整体振动外同时还有分段振动，因而都属于复合振动。例如，琴弦在振动时，除了弦的整体在振动，其它部分如弦的1/2、1/3、1/4段等，同时也在振动（见图7-1）。

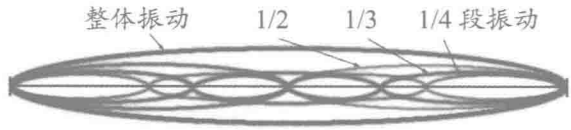


图 7-1 弦的复合振动示意图

不仅弦振动如此，空气柱振动、皮膜振动、各种各样的板振动和棒振动（见图7-2）也基本如此。绝大多数乐器所发的音也都是复合音。

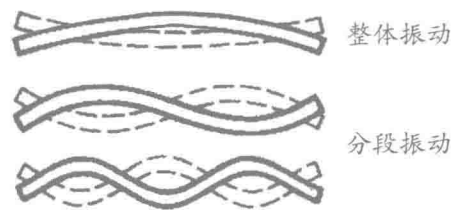


图 7-2 棒的复合振动示意图

纯音虽然难觅，但是通过一定控制手段还是能够听到纯音。目前最常用的手段是利用电子振荡器来产生纯音，既方便又纯正。可利用的设备除了专门的电子振荡发声器以外，还有市场上常见的电子合成器，这些设备中一般都有两个以上的电子振荡发声器，关掉其余的发声器，只保留其中的一个，并使之发出正弦波声响，即可产生纯音的效果。

在弦乐器上，利用“泛音奏法”，也可听到近似纯音的效果。所谓泛音奏法，就是用手指轻按琴弦的1/2、1/3、1/4处，其作用一方面使之成为振动的节点，同时也抑制了其它部分的振动，其效果等同于物体的单一振动。

人们用来定音用的音叉，其特定的构造使之在振动的时候，整体振动的能量比较强，分段振动的能量非常弱，人耳几乎听不到分段振动的声音，因而也可视为单一振动，它发出的声响非常接近纯音。

从线性的角度讲，复合振动可以视为单一振动相加的结果，那么复合音也可视为纯音的聚合物。因为纯音的物理结构单一，所以从听觉角度讲，所有的纯音听起来只会有音高和强度上的差异而没有音色上的区别。换言之，所有的纯音的音色听起来都具有相似性。正因为如此，在听觉心理研究上，一般都用纯音信号来制作听觉测量的声音样本，以保证信号源在音色上的统一。本书前面提到的“等响曲线”“人耳可感音域范围”“人耳最小音差分辨阈”等听觉心理实验都是在纯音信号基础上完成。

音乐人士需要注意的是，听觉心理实验的数据多以纯音作为信号源，而音乐实践中却以复合音为主，故很可能出现这样的问题：一些听觉心理实验的结果可能与音乐中的实际情况“对不上号”。这时，只有了解纯音与复合音的区别，才能对那些实验数据所表示的意义有更清楚的认识。

第三节　基音与泛音

复合音中每一个纯音成分都有特定的称谓。在物理声学中，物体做复合振动时产生的每一个声音成分称为“分音”(Partial tone)。其中，物体做整体振动时产生的声音称为“第1分音”，同时又称为“基音”(Fundamental tone)，其它分音则依振动频率由低至高顺称为“第2分音”、“第3分音”等。有时，基音以外的分音又称“高列分音”(Upper partials)。

在音乐声学领域，因为面对的振动物体多是能够发出乐音的物体，如弦或管，这些振动体高列分音与基音之间基本构成整数倍的关系，因而音乐声学将这些振动体产生的高列分音称为“泛音”(Overtones)或“倍音”；又因为这些泛音听起来比较和谐，故又统称为“谐音”(Harmonics)。基音称为“第1谐音”，其它谐音按整数倍的顺序称为“第2谐音”“第3谐音”等。

目前在我国，由于翻译的问题，“分音”“泛音”“倍音”和“谐音”之间常常互相混淆，给一些读者造成概念理解上的麻烦。这里为清楚起见，特将四个名词之间的关系归纳如下：

1. 分音：是指复合振动体中的每个声音成份，常用于描述构成非整数倍声音关系的复合音。基音为第一分音。

2. 泛音：是指复合振动体中基音以外的每个声音成分(不包括基音)，常用于描述构成整数倍或接近于整数倍声音关系的复合音。基音不是第一泛音。

3. 倍音：意同“泛音”。

4. 谐音：特指构成整数倍或接近于整数倍声音关系的分音。基音为第1谐音。

需要注意：由于泛音或倍音中不包括基音，因此如果我们讲到“第1泛音”或“第1倍音”(1st Overtone)，其实是指“第2谐音”(2nd Harmonics)或“第2分音”(2nd Partials)；而“第2泛音”或“第2倍音”，则指“第3谐音”或“第3分音”，依此类推。

另外，还要注意把声学理论中的泛音与用泛音奏法演奏的泛音区别开来：前者是指复合音中的分音成分，后者是指一种特殊的音响效果。泛音奏法在弦乐器和管乐器上经常使用。

一般情况，复合音中的基音振动能量较强，泛音能量相对较弱，因此基音振动频率往往决定这个乐音的主观音高，但有时也有泛音能量强于基音的情况。譬如，当振动物体的质量很重，而激励的能量又相对较弱的情况下，会出现振动体局部振动强于整体振动的情况，这时，局部振动产生的泛音就会强于整体振动的基音。从听觉感知角度讲，虽然这时基音的成分依然存在，但其能量相对较弱，对听觉的影响力也弱于泛音，因此较强的那个泛音的音高就决定了这个复合音的整体高度。

上述情况经常出现在一些低音弦乐器和打击乐器中。例如，低音提琴的最低音是大字1组的E(E_1)，振动频率为43.6赫兹，其它三根弦的空弦音也低于100赫兹，由于人耳对100赫

兹以下音区的音高识别能力非常差，因此当低音提琴在100赫兹以下音区演奏时，人们所能感受到的音高并不是来自基音，而是来自第一泛音。幸好，弦乐器的第一泛音与基音总是构成八度关系（在音乐声学上讲是倍频关系），因而人们依然可以根据泛音判定其基音的高度。

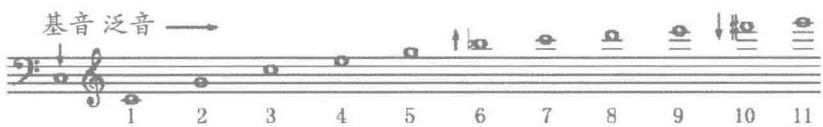
打击乐器的情况有所不同。以中国先秦时期铸造的青铜鎛钟为例，敲击一些体形较大的钟，其基音很低，人耳往往不能明辨其音高，而能在听觉上产生音高感的，倒是基音上方的一些分音（因为这些音在频率上并不与基音构成整数倍关系，故不宜称为泛音），由于这些分音与基音不构成八度关系，因而我们无法凭借分音来判定基音的高度。还有一些编钟，由于特殊的铸造和加工工艺，其整体振动和局部振动可以产生音高明显不同，但构成和谐关系的乐音，即呈现“一钟双音”现象。关于“一钟双音”的原理后面还会详细介绍。

还有一些复合音，其分音之间不构成整数倍关系且能量相互匹敌。这种声音，我们听起来会有音高不明确的感觉。敲击一些没有调好音的编钟、编磬或铜铃，就会有这样的感觉。

第四节 泛音列与频谱

在音乐声学和音乐理论研究中，为了便于大家理解复合音的构成，常常将基音和泛音按音高顺序排列起来，称之为“泛音列”（Serial of overtone 或 overtones）。如果基音与泛音之间呈整数倍关系，这个音列又称“谐音列”（Harmonics）。

谱例7-1 一个常见的谐音列



谱例7-1谐音列以小字组C为基音，外加11个泛音，这些泛音的频率与基音都构成整数倍的关系，即如果以基音的振动频率作为1，其它泛音的频率便与之构成1:2:3:4:5……这样的比例关系。

通过分析上面谐音列的谱例，我们可以看出如下规律：

1. 各谐音之间的音程呈递减关系：基音与第1号泛音之间呈纯八度关系，第1与第2号泛音之间呈纯五度关系，第2与第3号泛音之间为纯四度，第3与第4号泛音之间为大三度，其后逐渐缩小至小二度。

2. 除第1泛音与基音构成八度关系外，第3、第7号泛音也与基音构成复八度关系。

须知，谐音列是人们根据一些振动物体（主要是弦、管）泛音情况而归纳出来的音列，是一种人为的、抽象化的产物。切不要以为所有乐器发声时都会产生这样的谐音列。事实上，绝大多数乐器发出的声音，其泛音成份都与上述谐音列不符。其不同之处主要体现在两个方面：

其一，是泛音的数量。不同乐器发声时，其泛音数量往往各不相同，即便是同一件乐器，不同音区、不同力度和不同演奏技巧，其泛音数量也会有差异。

其二，是泛音之间的音程（频率比）关系。不同乐器，其泛音之间的音程关系并非都像谱例7-1谐音列那样，呈整数倍的关系。一般来讲，只有弦乐器和管乐器才具上面谐音列的音程关系，绝大多数打击类乐器的泛音之间都不是和谐的音程关系。

另外还有一个重要参量在谱例7-1谐音列形式中无法体现出来，那就是各个泛音之间的强度关系。不同乐器，其泛音之间的强度关系也是千差万别的，有的乐器是基音强、泛音弱，有的是基音弱、泛音强，还有的是奇数泛音强、偶数泛音弱，等等。

泛音数量、泛音之间的音程关系以及泛音之间的强度关系，是体现乐器声音特征的三个重要的参量，音乐声学采用一种特定的图形方式将这三个参量之间的相互关系体现出来，这种图形就称为“频谱”（Spectrum）或“声谱”（Spectrum of sound）。

典型的频谱是以二维的坐标形式来体现实际声响的泛音列情况，横坐标标示声音中每个泛音的频率，纵坐标标示每个泛音的强度。图7-3，图7-4所示是两件乐器发声频谱的例子。

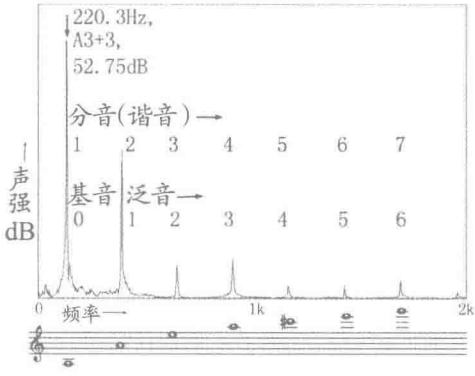


图7-3　钢琴a音的频谱以及与之相对应的五线谱

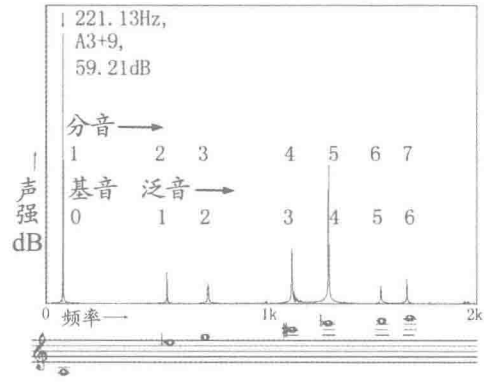


图7-4　编钟a音的频谱以及与之相对应的五线谱

上图7-3，图7-4中频谱体现了钢琴和编钟的泛音成分及其强度。二者基音的音高都是小字组a，但泛音列却不同：在音高关系上，钢琴的基音与后面6个泛音大部分构成协和或半协和关系；而编钟的泛音多与基音构成不协和关系，尤其注意第1泛音即与基音构成复减五度关系。在音强关系上，钢琴泛音的强度基本呈递减趋势，而编钟却以第4个泛音为中心形成一个波峰。正是由于以上差异，致使钢琴与编钟在音色上区别开来，前者较为柔和、清晰，后者较为明亮、粗糙。

频谱的结构与乐器的振动类型有关，一般而言，弦振动和空气柱振动的乐器，如二胡、小提琴、长笛等，其泛音的振动频率与基音基本构成简单整数比的关系，即1:2:3:4……故这种泛音列又称为“谐音列”。这类乐器的音色总体上讲比较清晰柔和，音高明确；而板振动、棒振

动和膜振动类乐器，如编钟、锣、鼓等，其泛音在高度和强度上与基音皆呈复杂的比例关系，且基本无章法可循，因此这些乐器的音色总体上讲比较生涩。

研究各种乐器的泛音列是非常有趣也很有意义的工作，其价值几乎等同于搞化学的人研究各种物质的分子式，如果说分子的结构决定了天下所有物质的性质，那么泛音列则决定了所有乐器（包括人声）的斑斓色彩。关于各种乐器的频谱特征，将在后面的乐器声学章节介绍。

值得注意的一个问题是，我国的乐理教科书在介绍基音和泛音知识时，一般都会给出一个类似前面出现的谐音列谱例，但不介绍其它种类的泛音列。谐音列只是诸多泛音列中的一种，它可以作为弦乐器和管乐器泛音列的代表，或用来介绍泛音列的一些基本概念，但不能涵盖所有乐器，更不能用来解释音乐中出现的所有音高现象。不讲清这一点的话很容易让学生产生误解，以为这个“标准的”泛音列可以代表所有的乐器，甚至把它视为一切音阶、音列现象之“源”。

对泛音列单一化的理解还会影响对和声学、配器法等作曲技术理论的学习。我国作曲家常把编钟作为我国古代乐器的典范加以运用，但鲜有精彩乐章出现，问题之一就在于不了解编钟泛音列的特点。前面已经介绍过，编钟的泛音列属于非整数比范畴，声音听起来并不和谐。利用特殊锉磨技术可以尽量突出钟的基音，削弱不协和泛音，但并不能从根本上改变钟本身泛音列的性质，并且这种技术也只能在一定音区内有效，低于大字组 G 就无能为力。有的作曲家由于缺乏泛音列常识，误把低音编钟当作协和的低音乐器频繁使用，导致作品音响嘈杂浑浊也就不足为奇了。

自然世界，声音万千，绝非一种泛音列体系能够承载。古希腊和古中国的音乐理论确实崇尚“谐音列”体系，但并不能说明古印度、古阿拉伯的音乐体系也是建立在这种泛音列基础之上，而在印度尼西亚爪哇岛上的甘美兰音乐中，更是找不到“谐音列”的身影。笔者认为，乐理教科书应当把这一点告诉学生。

第五节 乐音与噪音

无论在音乐声学还是在基础音乐理论中，经常提及乐音和噪音，但想找到区别二者的明确分野却非易事。这里以我国乐理教科书中一个较有代表性的定义为例加以分析：

振动规则的，听起来音的高低非常明显的，叫做‘乐音’。如定音鼓、小提琴、二胡、钢琴、笛子、琵琶等乐器都可以发出乐音。振动不规则的，音的高低听起来不明显的，叫做‘噪音’。如锣、钹、军鼓、木鱼等乐器所发的音，都属于噪音[1]。

[1] 李重光编著：《基本乐理简明教程》，人民音乐出版社 1990 年出版，第 1~2 页。

以上是用物理和心理两个判别标准来定义乐音和噪音，即“振动是否规则”是属于物理标准，而“听起来音的高低是否明确”则属于听觉心理标准。用两个学科标准来定义一种较为复杂的现象，借以提高定义的完整性是非常必要的，但上面定义并没有将这两个条件句之间的逻辑关系阐述清楚，因而总体上给人一种模糊的感觉：二者之间到底是“与”的关系，还是“或”的关系，抑或是“递进”的关系呢？如果是“与”的关系，那么完整的定义应当是“振动规则的，且听起来音的高低非常明显的，叫做‘乐音’”；如果是后两者的关系，定义中的“且”字应相应改为“或”和“因而”。表面上看是一字之差，但由此引发的对乐音和噪音性质的理解却大相径庭，因为这里存在一个对乐音性质的本质以及乐音的物理属性和心理属性之间相互关系的认识问题。

首先探讨定义中的听觉作用。应当明确，无论乐音或噪音都属于声音的范畴，根据笔者在前面讨论中有关声音的定义（即“声音是人类听觉系统对一定频率范围内振波的感受”），那么就可以认定在乐音和噪音的定义中，听觉的作用必不可少。基于此，定义中“听起来音的高低非常明显的”这一判断语句是判定乐音和噪音的关键条件，应当予以保留。因为除了听觉以外，其它事物譬如仪器，都不具备界定乐音和噪音的基本条件，有些仪器貌似能够显示乐音或噪音的测量结果，其实也是科学家根据人的感觉事先为其设定了一个阈值而已，其基础也是来自人类的听觉判断。

再来看听觉与振动之间的关系。按通常理解，振动是“物体通过一个中心位置，不断作往复运动”[1]，定义中“振动的规则性”当指振动在频率和频谱上的变化，因为只有这两个因素才会对音的高低产生直接影响。问题是，如果频率和频谱保持稳定，我们是否就一定能够听到一个“高低非常明显”的乐音呢？答案是否定的。我们举白噪声[2]（White noise）的例子来说明。白噪声是人工噪声的一种，取其名为“白”是借用光谱学中“白色”的含义，即在这种噪声中包含了人耳可听频域（20~20000赫兹）内全部声音、能量大致相当且稳定。这种噪声具有“振动规则”的一切性质，听起来恒定不变[3]，但是我们听这种白噪声不仅产生不了明显音高的感觉，甚至连音区的感觉都没有[4]。由此可见，规则振动的声音未必给人以明确的音高感觉，因此也就不能成为判断乐音的条件。既然不是一个有效的判别条件，就应当从定义中去掉。但是这并不意味着振动的物理特性与听觉感知没有任何关系，如果将二者结合起来作深入相关研究，还是能够勾勒出乐音和噪音在物理属性方面的一些基本规律。

下面列举三个有代表性的声音频谱——小提琴、中音锣、白噪声来说明。图7-5、图7-6、

---

[1] 中国社会科学院语言研究所辞典编辑室编：《现代汉语词典》修订版，商务印书馆1997年版，第1601页。

[2] “噪音”与“噪声”在汉语词典中通用，但是在使用习惯上，“噪音”具有更多主观意向，在口语和主观性较强的场合使用；“噪声”则更具有客观性质，多出现在声学教科书和相关定义中。

[3] 正是白噪声具有相当的稳定性，因而在声学研究领域常用来作为一种标准信号源。

[4] 白噪声音响效果与计算机电源风扇的噪声效果相似。

图7-7中，水平方向表示的是音的振动频率，纵向表示的是音的强度，每一根峰尖即代表一个泛音。峰尖上方的数值，标定了该泛音的音高（频率和音分值）和音强（分贝数）。

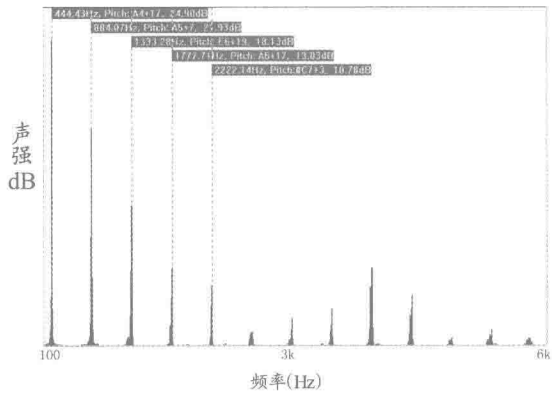


图 7-5　小提琴频谱

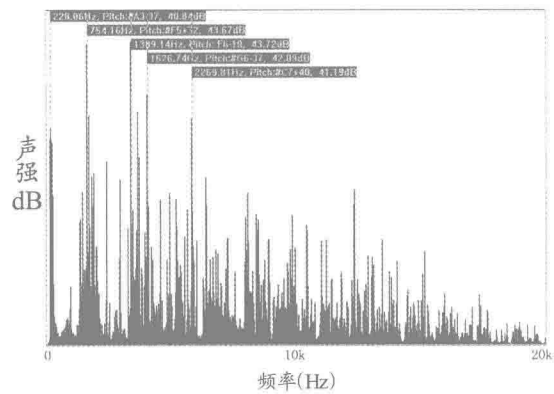


图 7-6　中音锣频谱

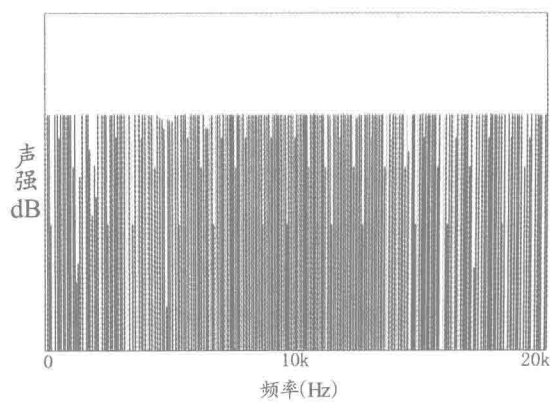


图 7-7　白噪声频谱

比较来看，三种频谱之间有如下区别：

1. 小提琴频谱中，基音（图形中左起第一根峰尖）与其主要泛音（基音右面的其它几个峰尖）在振动频率上构成整数倍的关系（1:2:3:4 ……），而锣和白噪声的泛音之间不存在这种关系，因而小提琴可以发出有明确音高的声音，即乐音，锣和白噪声则不能。

2. 小提琴和锣的泛音之间呈开放排列，白噪声的泛音呈密集排列。

3. 小提琴和锣的泛音强度自基音开始总体呈递降趋势，白噪声的泛音强度基本均等。

4. 锣和白噪声的泛音虽都不呈整数倍关系，但锣的泛音呈开放排列，因而某些强度较高的泛音仍能对人的听觉产生影响而产生一种大致的音区的感觉，因此也有学者称这种有音区感觉的噪声为“乐音性噪音”[1]，以区别那些根本没有音区感觉的纯噪声。白噪声由于泛音呈密集排列且强度平均，故不能对人的听觉产生任何明确音高的刺激。

归纳乐音和噪音在客观方面的差异，主要体现在泛音之间的频率、强度、排列的疏密程度三个方面。由此可知：如果泛音之间频率比为整数关系、总体强度自基音递减且呈开放排列，则可视为乐音；如果泛音之间频率比不是整数关系，但泛音呈开放排列，听起来可能会没有确定的音高，但会有一定的音区归属感；如果泛音之间频率比既不是整数关系，泛音也不呈开放排列，则听起来既没有明确的音高，也没有音区归属感，这才是真正意义上的噪音。

基于以上分析，我们可以对乐音和噪音作如下定义：

能够给听觉以明确高度的音，叫做“乐音”；没有明确音高，但有音区归属感的音，叫做“乐音性噪音”；既没有明确音高，也没有音区归属感的音，叫做“噪音”。

如果按这个标准来衡量，音乐实践中所使用的绝大多数都是乐音或乐音性噪音，极少噪音。噪音在音乐音响中虽“份额”极少，但“分量”很重。以下简单提及这些极少的噪音的来源以及它们的作用。

从微观角度讲，任何振动物体，包括乐器，无论其发声过程多么短暂都可分为三个阶段，即起始阶段、保持阶段和衰减阶段。起始阶段即振动体受到外力作用，其振动幅度从零达到峰值的过程，对于乐器来说，就是从无声到发声的瞬间；保持阶段是振动体保持振动的过程，此时振动频率和频谱保持相对稳定；衰减过程是作用于振动体的外力停止以后，振动体的振幅从峰值回落到零的过程。通过仪器的测量显示可以发现，所有乐器在起始阶段都具有明显的噪音性质，譬如弦乐器琴弓触弦的瞬间，弹拨乐器手指拨弦的一刹那，以及所有管乐器在吹响之前的短暂过程等，无一例外都属于噪音的范畴。这些噪音是我们分辨乐器音色的重要依据。

此外，适度的噪声还可以增加音乐的感染力和真切感。譬如，吹奏长笛时吐气的噪声，声乐演员在歌唱中间换气的噪声，都已经成为增强音乐艺术感染力的因素，没有它们的存在，我

[1] 缪天瑞编著：《基本乐理》，人民音乐出版社 1979 年版，第 198 页。

们就会感觉音乐不真实。此外,噪音常常成为演奏者或演唱者表演风格的特征,这一点在流行音乐中最为明显。噪音还可以增强音乐音响的张力,例如在演奏弦乐器的高把位时,随着噪声的增多,紧张度也会随之加强。有时音乐中的噪音还具有强烈的时代特征,例如聆听阿炳时代二胡的音色或早期音乐唱片中的摩擦噪声和模拟型磁带录音机发出的沙沙的本底噪声,都可以马上把我们带回当时的年代。由此看来,在时代特征的识别方面,噪音的作用甚至要强于乐音。

早期的乐理教科书将有音高乐器发出的声音归为乐音,而将大多数打击乐器发出的声音归为噪音,但是近代声学研究表明,纯粹的乐音或噪音实际上在音乐中使用得极少,绝大多数的音乐声都包含乐音和噪音两种成分,只不过成分的比例不同而已。例如,小提琴发出的声音中,乐音占主要成分,但也含有琴弓擦弦产生的噪音,而这种噪音成分正是判别小提琴音色和各种演奏弓法的重要标志,如果将其去掉,人们就再也无法进行分辨。在噪声占主导地位的乐器中,如大鼓,其声音中也有一定的乐音成分,能够使我们大致区分鼓声的高、低。因此,对于音乐声来说,乐音和噪音的区别和价值不像其它学科那样鲜明和肯定,或者说,乐音和噪音同属音乐声中不可缺少的、有价值的成分,共同构成了音乐声的两个重要方面。

章后思考与讨论题

1. 自然界中是否存在“纯音”？如何才能听到？音乐声学研究中为何经常使用纯音？
2. 分音、泛音和谐音三者之间有何区别？基本乐理教科书中经常使用哪种称谓？
3. 在复合音中，相对泛音而言，基音的强度是否永远最高？
4. “不同乐器有不同的泛音列”这种说法是否准确？为什么？
5. 泛音列与频谱之间有何关联？有何区别？
6. 频谱能够让我们了解音乐的哪些奥秘？请举例说明。
7. 为何说“噪音是我们分辨乐器音色的重要依据”？道理何在？

第八章　音乐声学测量

第一节　音乐声学测量的作用

常有人问我，音乐声学测量对音乐到底有什么用？言外之意就是，音乐作为一种艺术形式难道还需要测量吗？的确，音乐作为一种艺术存在的时候，只要用心欣赏就是了，根本不需要测量（甚至也不需要评论和解说），但是人类有着与生俱来的求知欲望，这种欲望驱使我们在欣赏音乐之余，萌发了探求音乐之“所以然”的念头，在这种求知本能的作用下，人类开始了对音乐声学的探索，音乐声学测量也就随之而产生。

从宏观角度讲，音乐声学测量的作用主要体现在以下三个方面：

一、为音乐声学研究提供客观数据

如果说音乐声学研究旨在探索音乐客观本质的话，那么音乐声学测量所起到的作用，就是对这种探索工作的实施与验证，最具体的表现就是提供客观且直观的测量数据。例如，我们想了解不同乐器之间音高的差异，就需要对它们的振动频率进行检测；如果要探索其音色差异的物理本质，就需要对它们作频谱和波形的测量。假如没有这些测量工作，虽然我们从主观上也可以感觉到其中音高和音色的差异，但我们却不能准确讲出差异的量值，也无法得知其中物理量的区别。

有些声学测量项目看起来似乎是非常主观的，如对音乐音质的主观评价，对乐音属性的听感测量等，因为这些数据都是人们主观判断的结果。然而研究者可以在测量过程中采用一系列技术手段，排除主观判断的随意性和偶然性，最终还是可以得到比较客观的测量结果。我们已知的一些数据，如“人耳等响曲线”“人耳最小音差分辨阈”等，都是用这种测量方式得到的。由于这些结果可以代表绝大多数人的主观感觉，因而可视为客观数据。

二、为音乐学研究提供客观数据

“音乐学”（Musicology）是“对音乐艺术进行研究的诸理论学科的总称”[1]。其主要研究内容包括三大门类：历史音乐学（Historical musicology）——主要研究音乐历史的发展具体过程

[1]　缪天瑞主编：《音乐百科词典》“音乐学”词条，人民音乐出版社 1998 年版。

和规律性，体系音乐学（Systematic musicology）——主要研究各种音乐分支理论的特点及其与音乐艺术的关系，民族音乐学（Ethnomusicology）——主要研究世界各民族的民间音乐和仪式音乐的特征和规律。

表面上看，音乐学研究似乎更关注音乐艺术本身的规律，与音乐声学测量没有太多联系，早期的音乐学研究确实具有这一特征，但进入19世纪以来，随着欧美科学家在音乐声学方面取得了一系列突破性的研究成果，提示了音乐声学家和音乐学家将音乐声学研究手段和研究成果应用到音乐学研究领域。本书序言中曾提到过的亥姆霍兹、里曼、施通普夫、霍恩博斯特尔和埃利斯等人，就是这一做法的代表人物。

今天，音乐声学测量在历史音乐学、体系音乐学和民族音乐学都得到广泛应用，对诸如音乐考古学、律学和听觉心理学这些含有较多数理或音响学成份的领域来说，声学测量工作更成为不可或缺的研究内容。有关这方面具体事例，我们将在本章第三节中详述。

三、为现代音乐产业提供科学依据

根据现代音乐生活现状，现代音乐产业的范围一般包括乐器制造业、音乐传媒业、与音乐剧场有关的声、光、像、机械制造业和电子音乐设备产业。从作用上讲，音乐产业已经成为音乐创作与传播的重要物质和经济的基础，为人们在第一时间里欣赏到高质量的音乐创造了愈加完善的条件。所有这一切，离不开音乐声学测量工作。

以国内乐器制造业中的手风琴为例，在使用声学测量手段之前，乐器的声音质量全凭主观听觉来判断，即使制造者是一位出类拔萃的乐器制造大师，音高听觉极其敏锐，由其制造的手风琴也无法保证每个音都符合十二平均律的音高标准，因为每个人都不能保证听觉永远不会疲劳和衰退。加之不同乐器出自不同调音师之手，更难保证每架手风琴都具有相同的绝对音高。这些手风琴一旦在一起合奏，自然容易出现音不准的问题。随着音准仪的引进，问题得到了彻底解决，这些测量设备可以“不知疲倦”地给出每架手风琴的绝对音高值，工人据此来调校音准，大大提高了手风琴音高的准确性。

电子乐器的发展也离不开声学测量和分析工作。例如，人们要用电子手段模拟出真实钢琴的音色效果，首先要完成的工作，就是要对自然钢琴的声音作深入细致的音色分析，找出各种音色的振动规律，而声学测量工作则是一切分析工作的基础。

综上所述，可以看出音乐声学测量对现代音乐艺术的发展具有十分重要的意义，为音乐艺术的普及和质量的提高发挥着基础性的作用。

第二节 音乐声学测量的历史

目前从考古发掘和文献资料来看，对音乐声进行有目的的测量至少已有八千多年的历史，其证据来自我国河南舞阳贾湖村出土的骨笛，在这些具有八千多年历史的骨笛上发现了用于计算音孔位置的刻痕（见图8-1 a、b 白色箭头所指处）[1]。这些刻痕说明，虽然当时没有出现声学测量设备，但我国古人已经有意识地利用声学测量方法中的计量、分析手段来调校乐器的音准。遗憾的是由于不能方便地接近出土乐器，我们目前还无法用实验手段来探究当时采用的是什么计算方法。

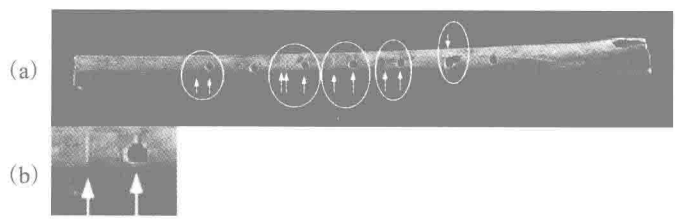


图 8-1 （a）贾湖骨笛照片 （b）局部放大照片

从目前考古发现和文献资料来看，我国在西周以前，可能还没有调校音高的标准器，人们可能都是凭借自己的耳朵来判断音调与音高是否准确，即“以耳齐其声”[2]。至先秦时期，人们发明了一种称为“均钟木”[3]的弦线式音高标准器，还有一种称为“律管”的管式音高标准器，用来考音定律。这些器具可以被视为早期的音高测量工具。这些器具虽不能直接给出声音的音高数值，但由于这些器具本身的音高数值已定，故可以通过比较的方式来间接了解其它声音的音高。

典籍记载的比较确定的音乐声学测量的事例，是用“折纸法”测量古琴琴弦的高度，关于此事，宋代科学家沈括（1031~1095）在《梦溪笔谈》中写道：

琴瑟弦皆有应声：宫弦则应少宫，商弦则应少商，其余皆隔四相应。今曲中有（应）声者，须依此用之。欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高下苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦震，此之谓正声。[4]

---

[1] 《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报》，《文物》1989 年第一期。

[2] 见汉代蔡邕的《月令章句》，汉魏遗书钞本。

[3] 《国语·周语下》第一册，第 132 页注③，第 124 页注⑫。

[4] 沈括《梦溪笔谈·补笔谈·乐律》。

沈括在《梦溪笔谈》中记述了如何用纸人来测量琴弦共振效果的方法：将纸人夹于共振弦线上，弹其应弦，则纸人跳跃，而在其他弦线上夹的纸人并不跳跃，这样，就极为容易让人识别发生共振的那些弦线。沈括所记用以检测共振的纸人，在西方17世纪的声学中称为“纸游码”。英国人诺布尔（William Noble）和皮戈特（Thomas Pigott）在17世纪以纸游码演示弦线的基频和谐频的振动情形。[1] 沈括以纸人测量共振的方法对后代有深远的影响，宋末元初的周密、明代方以智等人相继以小纸、羽毛等轻小之物检测共振弦线。

在18世纪的欧洲，德国人克拉尼（Chladni，1756~1827）用“克拉尼图”展示板振动的节线形态（见图8-2）。其成像原理，是将盐或沙粒放置在板上，然后用弓在板的边缘不同部位激发振动而得到的。他还测定了固体及其它介质中的声速。1866年，孔特（Kundt，1839~1894）则利用管内驻波精确测定了声速。

图 8-2　“克拉尼图”

在理论方面，特别值得一提的是法国数学家傅里叶（Joseph Fourier，1768~1830）在18世纪提出了一个非常重要的理论：任何一个周期性振动，无论其产生的波形多么复杂，都可以分解为一个包含基音和泛音的分音序列。此后，人们把所有对周期性波形中的泛音的分析与认定都称为“傅里叶分析”。今天的频谱分析仪的设计也是建立在该理论基础之上的。

德国科学家亥姆霍兹（Helmholtz，1821~1894）对声学测量也作出了杰出贡献，他设计球状的共鸣器可以分析声音中的泛音成份。他还用心理物理学的测量方法解释了“拍”与协和感之间的关系。

进入20世纪，示波器（Oscillograph）作为一种显示和纪录随时间变化的电量（如电流、电压）的仪器，逐渐成为显示声波性状的工具。由此，人们开始利用电量变化将“看不见、摸不着”的声波转变为可视的图形。此后，声级计、频率计乃至频谱分析仪的问世，对音乐声学的可视性研究起到了积极的推动作用，其中又以高分辨率频谱分析仪对音乐声学研究的推动作用最为显著，因为人耳对乐音的分辨极为精细，只有用高分辨率频谱分析仪才能模拟人耳的辨音能力。

比较而言，欧美发达国家在音乐声学测量技术上一直处于领先水平，在乐器声（包括嗓

[1] 〔美〕弗·卡约里：《物理学史》，戴念祖译，广西师范大学出版社 2002 年版，第 103 页。

音)、厅堂音乐声和听觉感知方面的心理测量方面,都已开展较为深入、细致地研究。这一方面与其较为悠久的音乐声学研究历史有关,同时也离不开较为先进、完备的硬件设施的支持。

我国具有现代意义的音乐声学测量工作始于20世纪初。刘复(字半农,1891~1934)在法国留学期间,用当时先进的"浪纹计"(即电平记录仪),对中国12个地区汉语方言的"四声"进行了测量,并首次提出中国的汉语的四声"只是频率高低之别"的结论[1]。回国后,他在北京大学创立"语音乐律研究室"。他在音乐声学方面最著名的研究是用仪器对天坛所藏中国古代编钟和编磬进行测音研究,开实验律学之先河。

我国音乐声学测量工作一直重视对动态音乐作测量分析和统计,因为这种测量对不同民族音乐风格的比较研究和民族音乐的律制研究十分有用。从20世纪50年代开始,中国艺术研究院音乐研究所(当时称"中央音乐学院民族音乐研究所")就开始了这方面研究,笔者则从1983年继续这一工作,不断积累动态音乐测量的经验[2]。

缺乏适用的测量设备一直是阻碍我国音乐声学研究的重要因素。20世纪80年代中期以后,中国艺术研究院音乐研究所视听技术实验室引入动态音乐测量设备[3],中国音乐界从此步入实时测量时代。随着计算机的普及,该实验室先后研制出多种实用的计算机测音系统,如"通用音乐分析系统""双音编钟音响检测系统""乐器声音品质检测系统"等等,这些系统成本低廉、便于升级,解决了进口声学检测仪器使用成本较高、没有音乐参量显示、不利于音乐学者使用的问题,已经在国内一些研究机构和乐器生产单位加以应用。

第三节 音乐声学测量项目

从理论角度看,音乐声学测量项目源于普通声学测量,是为解决音乐音响问题而建立的一套独具特点的测量体系。普通声学测量项目的理论和技术规范,基本都适于音乐声学测量,但由于音乐声学在具体测量对象和精度上有别于普通声学测量,由此也导致在设备要求和操作方式上形成自己的特点。

从总的类型上分,音乐测量项目可分为两大类:

一种是与乐音的性质有关的、基础性的测量,如对各种乐音作音高、音色和音强等方面的测量,此外,在音乐心理学和音乐生理学的研究过程中也需要利用音乐测量手段对实验过程

---

[1] 刘复:《四声实验录》(博士论文中译本),上海群益书社1924年版。

[2] 有关笔者这方面研究可参见:《论陕西民间音乐的律制》,《音乐学习与研究》,1985年第2期;《测音数据的可信度及其标准化》,《音乐学文集》,山东友谊出版社1994年版;《中西歌唱发声体系声音形态的比较研究》,《文艺研究》1996年第2期。

[3] 主要设备是丹麦B&K2032双通道FFT快速分析仪。

中的客观刺激量进行精确测量，以便与主观感觉量进行相关性研究。

另一种类型则属于与音乐实践有直接关系的测量，如对各种乐器（包括改良乐器和出土古代乐器）的声响特性进行测量等，对音乐厅堂的声场环境进行测量，对制作乐器的原材料进行声学品质的测量，以及对那些录制和播放音乐的电子音响产品的电声性能进行测量等。

前一种测量主要用于音乐界人士对乐音的基础性研究、听觉心理研究、音乐作品风格量化分析研究以及音准和律制方面的分析等。后一种测量方式则用于对常规乐器和改良乐器进行音响品质的分析，对音乐厅堂的声学特性检测，乐器制造过程的工艺流程和音质分析，以及各种电子音响产品和音乐传媒制品的性能检测等。

常见音乐声学测量项目归纳如表8-1：

表 8-1　常见音乐声学测量项目

基础性测量	对乐音基本性质的测量：如音高、音色、音强、音长的测量
	对实际音乐的测量：如协和度、音准度、律制的测量
	关于基础声学研究的测量：如振动、声速、波长、声级、相位的测量
	对音乐心理和音乐生理学研究所需信号源的测量：如对各种乐音信号精准度、稳定度的测量
应用性部分	对乐器声音品质的测量：如乐器的音准、音色、音强、灵敏度的测量
	对嗓音的测量：如嗓音发声频谱、共振峰的测量
	对音乐厅堂声场状况的测量：如厅堂混响时间、声场均匀度、频率响应状况的测量
	对涉及音乐声电声产品的测量：如对高保真放音设备音响性能指标的测量
	对音乐音响制品的测量：如对 CD 唱片、卡式录音带等音乐介质音响质量的测量

第四节　主观评价

“主观评价”也是音乐声学测量中常用的一种手段，就是用人的听感对音乐信号作出定量或定性的评价。这种方法经常用于听觉心理研究、乐器音质评测和音乐电声产品的评测。下面以电声产品的音质检测为例，介绍主观评价的作用和方法等问题。

一、主观评价在音乐电声产品质量检测中的作用

对于普通人来说，日常所听到的音乐声中，音乐电声占有较大的比重。例如平时听家庭音响，看电视和电影，唱“卡拉 OK”等等，都是在与音乐电声打交道。因此，这些电声产品音质的好坏，直接影响我们欣赏音乐的质量。国际国内已经有一套成文的标准，对这些电声产品的声音质量作客观检测和主观评价。其中，客观检测工作主要是对一些“硬性”指标进行

检测，如频响范围（即高低音的响应宽度），声功率变化范围、信噪比等指标。因为这些产品最终是要播放音乐给人来欣赏的，所以人耳对产品音响的综合感受才是最为关键的环节。有的产品虽然各项客观检测指标都出类拔萃，但综合听觉感受不佳，最终还是无法得到欣赏者的认可。就像一座建筑，虽然所用的每一种材料都属上乘，但成型以后并不一定好看，住起来也不一定舒适。产品要让人接受，关键是在设计理念上要“以人为本”。主观评价的作用就是要解决这个问题。

二、电声产品音质的主观评价方法

电声产品的音质主观评价要以规范的方式方法和程序进行。如电子琴的音质主观评价要由有经验的演奏家演奏，一些电声产品要用标准的“节目源”进行测听等等。对于试听条件、人员、节目源的内容、评分方法等都有具体的规定，有的已经有国家标准。

（一）测听环境条件

电声产品主观评价（也包括其它类别产品的主观评测）必须在标准听音室里进行。听音室有一定的空间要求，一般不能小于25平方米，混响时间一般在0.3~0.65秒（对250~4000赫兹频率范围而言）之间，偏离度不大于25%。听音室频响要均匀，无明显染色（即频率响应不均匀）现象，背景噪声小于35分贝，无明显回声、共鸣声等。听音室温度应在20~22℃之间，相对湿度在50%~75%之间。

被测的样机或样琴的放置方式，距后墙、侧墙的距离及放置高度都有规定。试听声级也有规定，一般在距声源1米处为70~90分贝（A计权），具体指标视产品特性而定。

（二）测听人员条件及测听方法

作为主观评价的人员，一般要选择身体健康、听力较好、了解音乐和音响知识的专家。人数不得太少，一般要5人以上。测听人员最好包括不同年龄层次，不同性别和不同专业知识背景的人。测听人员在听音室里的座位与测听对象及四壁的距离都有规定，主要是为了避免产生不必要的声音遮挡和反射。测听人员必须保持良好的“听音”状况，即身体、情绪方面无不适，且不能使听觉过分疲劳，每测听一件或几件样品以后要适当休息。

对于电声产品，测听方法可以是用一台标准样机，对每一台被测样机的每一项节目内容都一一比较，即由一台固定的样机或优质机放出标准（或参考）声后，立即与待测机相比较，或是隔一定时间听一次标准样机；或者是在待测机之间进行比较，选出相对好的产品。每位测听员要独立对各项测听项目打分或给出评语。

（三）评分方法

主观评价中最应注意的就是，如何在评分过程中排除测听人员的主观随意性。普遍使用

的方法是分别去掉最高和最低分，求总的算数平均值，但这样做的弊端，是在测听人员数量较少的时候，会无端浪费人力，同时也使一些有真知灼见的评分被排除出去。按 IEC（国际电工委员会）建议，则要对同一个产品进行重复三次的测听，这似乎又太烦琐。

有一种比较实用的方法，即在主观评价时，在一个单位时间内（如半天），把某一件待测样品随机重复一次，以每位测听员对这件样品两次测听中各个项目的评分重复率，作为该测听员的可信度因子加入到他本人的评判结果中。这样就充分利用了每一位测听员的测定结果，又公正地根据实际水平给予每位测听员一定的权重，克服了即使有经验的测听员也可能发生的临场测听水平发挥不正常的后果。从试行效果来看，这种方法是可行的。

第五节　常用测量设备

在仪器使用上，音乐声学与其它声学研究领域有一定差异，这主要是由研究对象性质所决定。首先，音乐声学所观察的声音范围一般在20~20000赫兹，即所谓的“音频范围”，那么测量次声（低于15赫兹）和超声（超过30000赫兹）的仪器就不适于音乐声学的研究。其次，由于人耳对声音具有相当精细的感受能力，因此，音乐声学对仪器精度（特别是在音高测量方面）的要求是很高的。

对于从事音乐声学研究的单位来说，以下设备当是必不可少的：

一、录音机

如果把所有的仪器与人的听觉分析功能作一类比，录音机（Recorder）就好比是人的耳朵。一个人如果没有功能健全的耳朵就不可能接收到真正的音乐信号，更谈不上对音乐信号加以分析。同样，一架录音机性能的优与劣也会直接影响到整个研究工作的质量。对音乐研究来说，最值得注意的是以下几个录音机的性能指标：

（一）频率响应

频率响应（Frequency response）通俗讲，就是录音机能采录到的高低音范围。一般家用收录机的频率响应只在100~10000赫兹以内，较高档的在60~12000赫兹左右，专业级的可达到20~20000赫兹。话筒和扬声器是决定录音机频响的关键因素，再好的录音机，如果没有配备高质量的话筒和扬声器也体现不出其特性。

（二）抖晃率

抖晃率（Wow and flutter）主要是针对专业级的模拟型磁带录音机转速的稳定程度而言，家用收录机的说明书中都没有标明这一性能指标。对专业级录音机来说数值越低越好，专业级要在0.06%（WRMS）以下。

(三)信噪比

信噪比(Signal/Noise)是指录音机工作时所发出音频信号与本底噪声的比率,用分贝(dB)来表示,数值越大越好。一般专业录音机的信噪比都在70dB以上,数码录音机(DAT)的信噪比则超过90dB。

二、传声器

传声器(Microphone),俗称话筒、麦克风,主要是用来拾取声音信号。作为音乐声学研究所用的话筒,都应达到专业级水平,主要体现在频率响应范围要宽,一般为20~20000赫兹,同时每个频段的灵敏度要尽可能一致。当然,这种级别的话筒价格相对较昂贵。

三、示波器

示波器(Oscillograph)是一种用来显示声音波形的仪器,对声音的音色或音高进行分析时常会用到它。在示波器的显示屏上,水平轴显示的是时间(单位为秒或毫秒),纵轴显示的是电压强度。通过示波器,不仅可以观察到各种声音的波形,也可以通过换算得出声音的振动频率,但作为音乐测量仪器目前已不多用。

四、音频信号发生器

音频信号发生器(Audio generator)可以产生音频范围内各种频率、各种波形的声音信号,有的仪器还可以产生白噪声、粉红噪声和蓝噪声。这种仪器常用作听觉心理实验或厅堂声场条件测量。

五、滤波器

滤波器(Filter),顾名思义,其作用就是将不需要的声波滤掉,常用于定制心理测量使用的声音信号。譬如,要了解1万赫兹以上高频声波对音色感觉的影响,就需要两种音源信号,一种含有1万赫兹以上的声波,另一种没有。制作后者的声源信号,就需要用滤波器将声源中1万赫兹以上的声波过滤干净。

六、音准仪

音准仪(Electronic tuner)是用来测量或校准乐音音高的仪器,一般以音分(Cent)作为计量单位。我国音乐界目前常用的音准仪有两种,一种是转子式,属于一种电子与机械相结合的测量设备;另一种是晶振式,完全采用电子手段完成测量过程。就目前情况来看,前者具有精度高,便于观察的优点,缺点是体积大,不便携带;后者的特点是体积小,可以随身携带,并且能够发出十二个半音的音响,有的仪器还可以发出不同律制的音阶声响,其缺点是测量

精度不高。无论转子式还是晶振式，都只能测量时值在三秒钟以上的乐音，时值短于三秒时，仪器不能给出稳定、可靠的数值。

七、频率计

频率计（Frequency counter）是一种测量声音频率的仪器，可用于乐音音高的测量。与校音仪相比，其反应速度要快一些，一般都是以数字的方式显示测量结果。对音乐工作者来说，因为显示结果是赫兹（Hz）数而不是音分，故略感不便。

八、声级计

声级计（Sound level meter）是用于测量声音强度的仪器，显示单位是分贝（dB）。声级计一般都设有不同的计权档位，以适用于不同的使用需求。声级计主要使用在厅堂声学指标和环境噪声的测量，对于音乐理论研究来说，这种仪器的使用率比较低。

九、频谱分析仪

频谱分析仪（Spectrum analyzer）是一种用途极为广泛的声学测量仪器，音乐研究多使用量程在20~20000赫兹的频谱分析仪。高档的频谱分析仪不仅可以测量声音的频谱，还可以对声音的高度、强度、时值、相位、波形等一系列参数进行实时测量。对音乐工作者来说，其唯一不方便之处，就是不能直接给出音分值。

十、计算机

近年来，计算机（Computer）在音乐声学研究中的作用越来越大。它不仅可以用来存储测量数据，而且能够直接进行测量和分析。例如，在目前已经较为普及的微机里面装上一块声卡，再加上专门频谱分析软件，就能对声音进行频谱分析。此时，计算机的功能几乎就相当于一台频谱分析仪。当然，声卡的质量非常重要，有条件的话应尽量选用专业级的声卡。主要关注的指标是模数转换的字节数和采样率，目前最常用的是24字节模数转换能力和96K的采样率（俗称2496）。

用计算机替代专用声学测量设备的最大好处是可以“一机多用”，因为测量软件可以通过升级来提高测量性能，对用户来说比较经济。随着计算机性能不断提高，用计算机进行声音分析的前景必将越来越广阔。

十一、绘图仪 / 打印机

绘图仪或打印机（Ploter/Printer）的作用，是将测量仪器或计算机的测量结果以图形或数值方式绘制或打印出来。

上述仪器都属于通用型音乐声学测量设备，还有一些测量设备专用于一些特定的声学测量项目。如专用于语言声测量的“语图仪”，专用于房间声场环境测量的“厅堂测试仪”，专用于显示旋律曲线的“旋律仪”等，这些仪器的功能比较明确单一，故可称为“专用型仪器”，并非每个声学实验室都要配备。

除了仪器之外，一些辅助器材对音乐声学测量也必不可少，如各式各样的转接口和线缆，校准仪器用的校准器和校准软件，保障仪器精度的设施（如干燥瓶、稳压电源、不间断电源）等，也属于音乐声学实验室必备的器材。

第六节 音乐声学测量需要注意的问题

音乐声学测量工作的终极目的，是要获得能真实反映音乐声的准确数据。根据笔者近多年从事音乐声学测量工作的实践经验，认为下列因素对测量的准确性来说至关重要，值得特别关注。

一、测量样本的典型性

在从事音乐测量过程中，经常会碰到这样的情况，一些研究者提供的测量样本不具备典型意义。譬如，本来想要通过频谱来了解二胡音色的一般特性，使用的样本却取自一把音色个性很强的二胡，或者演奏者用了非常规的演奏技巧；再譬如，本来想要了解秦腔中存在一些有特点的音律现象，使用的样本却不是出自名家名段。在这种情况下，即使我们的测量工作很认真且规范，但所得到的结果却不具典型意义，因为在样本的选择上我们已经犯下了根本性的错误。

测量样本是否具有典型性完全取决于人们对测量对象的了解程度。举例讲，要想获得具有典型性的二胡频谱的测量样本，我们不但要知道二胡的基本演奏方式、技法和常用音区，还要注意选用最具典型意义的二胡，并聘请最具权威的演奏者进行演奏才行。这里应注意：由于我们测量的对象属于艺术范畴的音乐音响，因而不能将“典型性”等同于“唯一性”。仍以二胡为例，事实上我们根本无法确定一个最具典型意义的二胡测量样本，因为在中国二胡从制作到演奏历来就有南、北两派之分，只有将这两派的音响都收容进来，才能说测量样本具有了一定典型性。从这个意义上说，“典型性”更多意味着“全面性”。

在民间音乐样本的选择上，特别注意不要盲目追求演唱、演奏者的名气和资历，而要注重实际的演唱或演奏水平。譬如，有些上年纪的老艺人，由于生理原因听力和身体条件水平急剧下降，在演唱或演奏时音准、音量和音色都与年轻时大相径庭，这样的音乐已不具代表意义，所以也不适于用作测量样本。

二、测量程序的合理性

众所周知，做任何事情，如果程序不具合理性，自然无法保证其结果的合理性。音乐声学测量程序是否合理也关系到测量结果的可信度。有时从一些与音乐声学和律学研究相关的文献中，我们发现研究者使用了测量数据，但没有提供测量程序的说明和测量报告，那么读者自然会提出疑问：这些数据是怎么得来的？是否能体现声音的本质特征？

测量程序是否具有合理性的一个重要标志是：在整个测量过程中，是否能尽量排除主观和外界因素对测量工作的干预，从而取得尽可能客观的的测量结果。对此，我国音乐界已有一些较为成熟的经验性做法，如乐器演奏者在测量过程中不能对测量数据进行干预，设立监测人制度，发表测量报告等。这些程序保证了测量工作的真实性，因而应当继续沿用下去。

三、录音设备和传声器的选用

录音设备应首选那些性能稳定、可靠、保真度高的机器。随着数字录音技术的飞速发展，目前便携式专业数码录音机的性能越来越强大，基本都能达到24位/96K以上的采样精度（高保真）。由于数码录音机的内存卡可以更换，录音时间几乎没有限制。其价格也逐年降低，目前（2013年）多数机器价格在2000元以内，已成为音乐工作者常用设备。优质传声器是保证录音样本质量的先决条件，一些专业的传声器价格往往高于便携式数码录音机。

在传声器的选用上要注意下列问题：

1. 要测量的对象发音纤细或泛音丰富，如像弦乐器、管乐器和口簧类乐器，应当选用电容话筒。

2. 如果测量对象发音瞬态能量变化范围很大，如一些打击乐器，应当考虑使用动圈传声器。

3. 作为测量乐音基本性质的声音样本，以样本“纯度”为第一目的，因此尽量不用立体声话筒，以免造成不必要的信号干扰。

4. 在外出录音时还要注意带上话筒支架，如有条件还应带一架小型调音台，这样可以保证录音效果达到最佳水平。

四、录音过程中的技术问题

对于未受过专门训练的音乐工作者来说，录音时特别要注意以下事项：

1. 录音电平（Record level，即录入机器内的音量）大小要合适，电平太小会突出录音信号的本底噪声，电平太大则引起信号失真。

2. 话筒摆放位置要合理，一般要靠近并直对声源，同时还要注意尽量避开或远离噪声源，这样才能提高所录信号的保真度。

3. 随时注意电源电压情况。一般来讲，采风式的录音都携带使用电池供电的录音机，除高档录音机外，普通机器在电压下降时都没有自动停机装置。这就需要录音人员要不断检查电池电压是否有电，不然就有可能导致录音时录音机的转速降低，录出来的声音信号在音高和音色及时值上都有很大失真。

4. 做好录音档案，特别是较重要的录音工作更要注意这个问题。应该建立这样一个概念，一个完整的录音材料不仅仅是录音磁带，还应包括所有对磁带内容有说明意义的文字材料。一份完整而准确的录音文档，是提高测量工作可信度和工作效率的基本保证，而文档不齐全的录音资料会给后人的工作带来很多麻烦。因此，在录音文档记录工作上，要尽可能记录下录音工作的每一个细节，作为录音工作总的说明文件，应当做好《录音报告》的填写。必要时，要与《测量报告》放在一起，构成音乐测量工作的全部文档。

《录音报告》至少应当记录和说明以下内容：

（1）录音对象；

（2）录音工作的时间、地点和环境状况；

（3）录音对象的物理特征状况；

（4）录音对象的背景状况，包括历史状况、出土状况（对出土乐器而言）、产权归属、拥有者状况、目前使用状况等；

（5）录音器材状况；

（6）录音方式；

（7）录音人员；

（8）总体评价。

五、测量仪器的选用

测量仪器的选用应依据“根据测量对象选用合适的器材”的原则。首先，应确定测量目的。例如，要解决的是音高问题，就要选用频率计、音准仪或频谱分析仪一类的设备，而不能使用声级计；如果要探讨音色问题，则只能使用频谱分析仪或语图仪一类的设备，而不能用频率计和音准仪。

其次，在选择仪器时还要考虑仪器的精度。一般在仪器使用说明书中都会标出，在使用一架新的仪器之前，第一件要做的事就是熟悉说明书，不仅要了解使用方法，还要知道仪器的误差，这样才能对测量数据的精度做到“心中有数”。

六、测量环境的选择

应当特别注意录音环境的选择，尤其在不使用线路输入，而是采用话筒输入声音信号的时候，更需注意测量环境的声场条件是否合乎标准。为保证测量工作的精度和可信度，在录

音环境的选择上，要考虑基本原则是，要尽可能保证音响具有较高的“纯度”，即不要掺杂其它与被测对象无关的音响。据此原则，应当从以下几个方面加以考虑：

1. 混响时间。音乐测量工作一般需要在符合一定声学标准的实验室内进行，对制造乐器原材料和电声产品声学品质的测量一般要求在消声室内进行（该室不会产生任何反射声和混响）；对音乐音响、乐器音响和主观听觉心理进行测量应在标准听音室内进行，其混响时间一般应控制在0.3~0.65秒（对250~4000赫兹频率范围而言）之间，偏离度不大于25%。

2. 背景噪声。无论录音、还是测量，环境噪声一般都应控制在35分贝以下。同时还要注意环境内不要存在容易引起共振的器物。

3. 环境温、湿度。为保证测量精度，测量环境的温度应在20~25℃之间，相对湿度在50%~75%之间。

七、测量人员的操作水平

测量人员的操作水平与测量质量的关系最为密切，再先进的仪器也无法代替人的作用。从音乐研究的特殊性角度来看，一个合格的测量人员起码应具备下列条件：

1. 具有一定的音乐理论和实践基础。
2. 熟练掌握录音、放音技术。
3. 能根据测量数据使用者要求以及测量对象制定出合理的测量程序。
4. 熟练掌握常用的测量仪器。
5. 具有获取数据和分析数据的能力。
6. 能写出符合规范化要求的测量报告。

八、测量报告的写作

测量报告是对整个测量工作的总结性描述。一份能够说明问题的测量报告至少应包含下列内容：

1. 测量内容（应说明测量目的、用意）；
2. 测量对象；
3. 测量时间、地点及环境条件；
4. 测量仪器（如果测量样本是录音制品，还应包括录放设备）；
5. 测量流程（最好以框图形式来体现）；
6. 测量人员（要注明每个人的担当的工作）；
7. 测量结果（原始数据）；
8. 误差分析（主要分析仪器本身及操作过程中可能出现的误差）；

9. 备注；

10. 测量人员签字。

除测量报告外，与测量工作相关的资料也应当妥善保存，待需要时备查。

九、分析报告的写作

由于一些研究者缺乏音乐声学基本常识，在原始数据的处理和分析上存在一定困难，因此就需要由测量方提供对原始数据的初步分析，以便研究者进行下一步的研究。对音乐界的测量工作而言，分析报告通常包括以下内容：

1. 对原始数据的初步分析，包括对数据的可信度分析，计量单位的统一转换、归一处理等。例如，对律学测音研究而言，需要将原始数据中的频率值转换为音名加音分值的形式，以方便音乐工作者使用。在转换过程中，还要排除音高误差的因素。

2. 利用原始数据说明被测对象所具有的声学特征，这项工作主要适用于乐器和音响器材的测量。例如，通过特定的测量数据分析，可以对某件乐器的音准、音强和音色等属性进行评价。

撰写分析报告需要分析者对分析对象有比较深入的了解，多数情况下，需要测量者和测量需求者双方密切合作，才能写出高质量的分析报告。

章后思考与讨论题

1. 对不从事音乐研究的人来说，有必要学习音乐声学测量吗？
2. 常用音乐声学测量项目有哪些？你曾经使用过哪些音乐声学测量？
3. “主观评价”与音乐声学测量有何关联？参与主观评价的人员应具备哪些条件？
4. 常用音乐声学测量的设备有哪些？你自己的计算机能否用于音乐声学测量？
5. 在音乐声学测量过程中要注意哪些问题？你个人认为哪个问题至关重要？

第九章　乐器声学构成与乐器改良

第一节　乐器的声学构成

乐器声学所关注的问题，主要是从声学角度探讨各种乐器的发声机理，并对其音响性能的改善进行研究。

人们常常从各自需求出发对乐器结构进行分解，以方便使用或调整。以小提琴为例，演奏者常常将其分为琴身、琴马、琴弦和琴弓四个部分，因为演奏者经常要对这四个部件进行调整以求得到最佳演奏性能。到了制琴者那里，则会从制作程序的角度对提琴结构进行分解，一般会分为背板、面板、侧板、琴头、指板等；其它部件，如琴弓、琴马、琴弦、弦钮、系弦板等，通常可以通过采购获得，故很少将其列入结构系统。

到了音乐声学领域，自然要从声学角度对乐器进行分解。从音乐声学角度看，一件完备的乐器可分解为以下四个基本部分：

1. 振动体，即产生振动的物体。如弦乐器的琴弦、木管乐器的簧片、空气漩流（就边棱音乐器而言）等。对吹管乐器而言，一般都有两个振动体：第一振动体是最初振动的物体，如簧片、空气漩流、嘴唇等，第二振动则是由第一振动体所引发、形成的管内空气柱。

2. 激励体，即能够激发振动体振动的物体。如弦乐器的琴弓、钢琴的琴槌，吹奏或歌唱者胸腔中的气流等。

3. 共鸣体，即扩散振动体振动能量的物体。如弦乐器的琴箱、琴筒，钢琴的音板，歌唱者的口腔、鼻腔等。有些乐器的共鸣体同时还具耦合作用，即对发声体的音高起调节作用，如一些管乐器的管体、木琴和钟琴下面的共鸣管等。就弦乐器而言，一般共鸣体还有一个附加成分——传导装置，将琴弦振动传导至共鸣体，例如二胡的琴码，琵琶的覆手，筝的弦柱等。

4. 调控装置，即对乐器的音响和演奏性能加以控制的装置。如钢琴的击键和止音装置、管乐器的按键、手风琴的风箱等。

振动体和激励体是所有乐器发声的必备条件，即使再简单的乐器也不可缺少这两个结构，否则根本无法发声。有的乐器形状看似复杂，体积庞大，但其声学构成却很简单。譬如像云锣、大型镈钟、编磬等，只有振动体和激励体。而看似最简单的乐器——口哨，反倒声学构成完备，有激励体（胸腔中的气流）、振动体（在嘴唇边缘产生的空气漩流）、共鸣体（口腔）和调控装置（口腔周围的肌肉和舌头）。

从声学角度对乐器进行分解的最大好处，是有助于乐器改良者准确找到影响乐器音响性能的关键要素。一般而言，衡量一件乐器的音响性能主要通过音色、音量和音准这三个指标，不同声学构成对这三个指标的影响程度各有侧重。譬如，振动体对音色的影响最大，其次为音量和音准；激励体对音量的影响最大，其次为音色和音准；共鸣体对音量的影响最大，其次为音色和音准；调控系统对音准的影响最大，其次为音量和音色。我们一旦清楚了乐器声学构成与音响性能之间的对应关系，就能有针对性地改良乐器音响，提高乐器改良效率。譬如，我们要增加一把二胡的音量，通过上面的对应关系，我们可以着重从激励系统（琴弓）和共鸣系统（琴筒）两个方面入手去解决问题，因为这两个系统对音量的影响最为直接，虽然振动系统（琴弦）和调控系统（弦轴）对二胡音量也有一定影响，但程度远不及前两者。

有些乐器会超出上述规律，主要体现在一些打击乐器上。例如，镲、拍板等，因为其振动体和激励体同为一体，调整音色和音量时就会麻烦一些，二者往往相互牵扯，这就需要在不同音响性能之间找到一个最佳平衡点。有一些吹管乐器，譬如竹笛、长笛等，虽然其调控装置对音准的影响程度很高，但其激励体（气旋）也能对音高产生直接的影响。像钢琴这种声学构成比较完备的乐器，其调控系统不仅可以影响音准，还可以影响音色和音量。

在衡量乐器音响性能的指标中，除了音色、音量和音准外，还有一个比较重要的指标往往被人们忽略，这就是均衡性。即乐器的音色、音量和音准能随音区延伸做均衡改变，而不是突变，只有做到这点才能算得上高档演奏乐器。这主要体现在一些音域较宽的乐器中，如钢琴、擦弦乐器、拨弦乐器和多孔吹管乐器等。有时我们听一些低档乐器，会感觉其在某些音区音响也很优异，但仅仅是偶尔现象，无法持续。如果从声学原理上分析，出现这种情况的主要原因还是共鸣系统与振动系统不匹配所致，因此要从这两个方面着手去解决问题。

总之，无论什么乐器，只要我们能够从声学角度对各个部件加以分析、归纳，就能迅速找到影响其发声的关键要素，进而提出科学的解决之道。

第二节　乐器的分类

世界的乐器品种多样，五花八门。人们出于辨识、研究的方便，喜欢将它们作归类处理。不同的年代和不同的目的，导致对乐器分类的方法也多种多样。以下是三种较为有代表性的分类法：

一、八音分类法

中国古代有一种按乐器的基本制作材料分类的方法，称“八音分类法”。所谓“八音”，是指八种材料：“金、石、土、革、丝、木、匏、竹”。

“金”指用金属制作的乐器，如编钟、錞于等。

“石”指用石或玉制作的乐器，如磬。

“土”指用陶土制作的乐器，如埙、缶等。

“革”指用动物皮革制作的乐器，如鼓。

“丝”指利用丝弦制成的弦乐器，如琴、瑟等。

“木”指木制的乐器，如柷（读 zhù）、敔（读 yú）等。

“匏”指用葫芦制成的乐器，如笙、竽等。

“竹”指用竹子制成的乐器，如篪篥、篪（读 chí，古代两端封闭的笛子）等。

八音分类法的优点是比较直观，当时既没有声学观测仪器，又没有系统的声学理论指导，按乐器制作材料来分类应当说是一种顺理成章地选择，但在今天看来，八音分类法也存在不足之处。首先，“八音”并不能涵盖当时所有乐器的材料。例如，古代还有一类乐器是用兽骨制成，80 年代后期在河南舞阳地区贾湖村，就出土了一些用丹顶鹤的尺骨制成的骨笛。再者，“八音”分类无声学章法可循。按道理“八音”应当按振动体的材料来分类，譬如琴和瑟都是在木质琴身上张弦的乐器，这两种乐器之所以归为“丝”而没有归为“木”，就因为振动体是丝质的琴弦，不是木质的琴身。按此逻辑，笙和竽不能归为“匏”而应当归为“金”或“竹”，因为这两件乐器的振动体是铜制或竹制的簧片，“匏”（葫芦）只是共鸣体。

二、管弦乐队分类法

这种分类法源于欧洲，是以西洋管弦乐队中乐器声部的划分模式为分类原则，所有乐器分为弦乐器，管乐器、打击乐器三大类。每一大类还可进一步细分，如弦乐器可分为拉弦乐器（如小提琴）、拨弦乐器（如竖琴）和击弦乐器（如钢琴）；管乐器可分为木管乐器（如单簧管）和铜管乐器（如小号），等等。另有一种分类法是在上述三种乐器的基础上增加键盘乐器（如钢琴、管风琴）和人声乐器。

作曲家写总谱时经常按这种分类法来划分声部，一般是按木管声部、铜管声部、打击乐声部、歌唱声部和弦乐器声部的顺序自上而下依次排列。大多数配器法教科书也都使用这种分类法。

这种分类法的优点是直观、简明，与传统管弦乐队的声部设置保持一致，因此为大多数音乐工作者使用，但由于这种分类法建立在西洋管弦乐队基础上，因而对存在于世界不同地区和民族中的其它种类的乐器，有时就无法进行有效的划分。例如，像口弦（一种利用口腔共鸣发声的簧片乐器）、木叶（一种能够利用嘴唇发声的树叶乐器）这些乐器，就无法归类到上述分类体系中。对于20世纪的电子乐器，传统的分类法也没有纳入其中。

三、萨克斯－霍恩博斯特尔分类法

针对上述问题，美籍德国音乐学家萨克斯（C.Sachs，1881－1959）和奥地利音乐学家霍恩博斯特尔提出了一种新的乐器分类原则：根据乐器的声学振动体特性进行分类。所有乐器分为“弦鸣乐器”（Chordophones）、“气鸣乐器”（Aerophones）、“体鸣乐器”（Idiophones）、“膜鸣乐器”（Membranophones）和“电鸣乐器”（Electronphones）。

据美国学者考夫曼的考证，早在公元前1世纪，在古印度一本名为《乐舞论》的书中，就已经把当时人们所用的乐器概括为“弦鸣”“气鸣”“体鸣”和“膜鸣”这四大类。他认为，萨克斯和霍恩博斯特尔提出的乐器分类法“也是以这四种类型为出发点的”[1]。尽管如此，今天人们还是将这种分类体系称为“萨克斯－霍恩博斯特尔分类法”。这种方法的最大优点是可以将世界上所有的乐器加以清晰划分，例如像口弦、木叶两种乐器，在萨克斯－霍恩博斯特尔乐器分类法中即可按振动体类型归为“体鸣乐器”类。

以下是萨克斯－霍恩博斯特尔乐器分类法的具体分类框架。

1. 弦鸣乐器

- 擦弦乐器
  - 弓擦
    - 板面
      - 有指板（如提琴类乐器）
      - 无指板（如板胡、椰胡等）
    - 膜面
      - 有指板（如坠胡、艾捷克等）
      - 无指板（如二胡、京胡等）
    - 有键（如按键提琴类乐器）
  - 轮擦（如轮擦提琴类）
  - 手拨
    - 框架（如竖琴、箜篌等）
    - 板体
      - 有柱（如筝）
      - 无柱（如古琴）
    - 板面——有指板（如琵琶、吉他等）
    - 膜面——无指板（如热瓦甫、班卓）
- 击弦乐器
  - 板体（如扬琴）
  - 键盘（如钢琴）

[1] 汉斯·希克曼等编著：《上古时代的音乐·古印度的音乐文化》，王昭仁、金经言译，文化艺术出版社1989年版，第160页。

2. 气鸣乐器

- 边棱音乐器
  - 吹孔
    - 单管
      - 横吹（如长笛、竹笛等）
      - 竖吹（如箫）
      - 鼻吹（如鼻笛）
    - 多管（如排箫）
    - 罐体（如埙）
  - 哨咀
    - 单管（如竖笛）
    - 罐体（如洋埙）
- 簧管乐器
  - 单簧
    - 单管 —— 拍簧（如单簧管）
    - 自由簧（如巴乌）
    - 多管 —— 自由簧（如双管铜笛）
  - 双簧
    - 单管（如唢呐、双簧管等）
    - 多管（如双管管子）
  - 管簧 —— 配合系 —— 自由簧（如笙）
  - 排簧 —— 自由簧（如口琴）
- 唇管乐器
  - 伸缩式（如长号）
  - 按键式（如小号、大号等）
- 机械簧乐器 —— 自由簧（如手风琴）
- 人声乐器 —— 自由簧（如人声）

3. 体鸣乐器

- 拍奏乐器
  - 棒体（如响棒）
  - 板体（如拍板）
  - 钵体（如钹）
  - 钟体（如碰钟）
- 击奏乐器
  - 棒体（如三角铁）
  - 板体（如磬、木琴等）
  - 管体（如管钟）
  - 钟体
    - 圆形（如圆钟）
    - 合瓦形（如中国先秦合瓦形钟）
  - 锣体
    - 盘形（如大、小锣）
    - 锅形（如芒锣）
    - 筒形（如铜鼓、钢鼓等）
  - 梆鼓（如木鱼、梆鼓等）

- 摇奏乐器
  - 球体(如沙锤)
  - 不规则体(如齿轮嘎声器)
- 拨奏乐器
  - 手擦(如口弦)
- 擦奏乐器
  - 弓擦(如乐锯)

4. 膜鸣乐器

- 击奏乐器
  - 筒形
    - 直筒(如大、小军鼓等)
    - 琵琶筒(如中国大鼓、堂鼓等)
    - 高脚(如象脚鼓)
    - 细腰(如仗鼓)
    - 长筒(如长鼓)
  - 箍圈形(如铃鼓、手鼓等)
  - 锅形(如定音鼓)

5. 电鸣乐器

- 电振荡乐器
  - 有键式（如有键盘合成器、电子琴等）
  - 键式（如无键盘合成器，又称音源）
  - 弦控式（如弦控式电子琴）
- 电扩声乐器
  - （如电吉他、电琵琶等）

萨克斯－霍恩博斯特尔分类法具有逻辑清晰、涵盖范围广泛的特点，因此在民族音乐学研究领域受到普遍关注，尤其在世界民间乐器研究方面，采用者极为广泛。相对于管弦乐队分类法而言，这种分类体系比较复杂，而且需要一些基础性的声学知识，因此在民族音乐学以外的领域应用者并不多。

因为本书内容的重点不在民族音乐学和民族乐器，考虑到大多数音乐工作者的分类习惯，本书基本采用“管弦乐队分类法”作为介绍乐器的基本分类依据，但在乐器具体类型划分上则以萨克斯－霍恩博斯特尔分类法为依据。

第三节　乐器改良规律

广义地讲，今天我们所能见到和听到的任何一件乐器，都是人类对其不断进行改良的结果。以今天的乐器之王——钢琴的演进过程为例：

钢琴的前身是发端于14世纪初的击弦古钢琴(Clavichord),其基本结构是在琴体内部的音板上装有并列的琴弦,用琴槌击弦发声。早期击弦古钢琴音域很窄,一般为3个八度,也没有止音装置,为避免琴弦振动时余音相互干扰,琴弦上都缠有织带,由此一来虽然没有了余音干扰,但琴声的余韵也荡然无存。经过音乐家和乐器制造家几个世纪的不断改良,1698年,意大利佛罗伦萨的一位名叫克里斯托福里(B.Cristofori,1655~1731)的乐器制作师,终于制作出一架带有控制余音长短装置击弦古钢琴,从此使钢琴声音的音长和音量变得可控[1]。1709年后,克里斯托福里又进一步改革了原来击弦机的结构,使击弦速度比原来加快了10倍,而且可以快速连续弹奏,音域也增加为4个八度组,可以说这就是现代钢琴的雏形。后来,德国管风琴师兼制作师西尔伯曼(G.Silbermann),在克里斯托福里发明的基础上,于1730年制造出德国的第一架钢琴,音域扩展为5个八度。他曾把这架琴送到音乐大师巴赫那里鉴定,在听取了巴赫的一些建议之后,于1747年又加以革新。西尔伯曼对钢琴改良的主要贡献,在于对钢琴制音器的改良,他利用一种手动装置使全部止音器能够离开琴弦,使钢琴的余韵效果更丰富(对于今天的演奏家来说,可能很难想象当时的延音踏板是用手来操作的)。

西尔伯曼对钢琴发展的最大贡献,恐怕在于对钢琴制作者的培养,他曾带出12名技术高超的钢琴制作大师,他们在西尔伯曼钢琴的基础上进一步对钢琴加以改良,并分别制造出两种不同风格的钢琴,即"维也纳式击弦机钢琴"和"英国式击弦机钢琴"。这两种钢琴具有不同的机械性能和不同的音响效果:"维也纳式击弦机钢琴"的键盘触感较轻,能够弹出快速的音符,音色变化细微,在与管弦乐队协奏时,音色对比清晰,比较符合莫扎特温文尔雅又富有歌唱性的快板的音乐需要;而"英国式击弦机钢琴"触键感觉较重,但声音浑厚深沉,这正适合于作曲家克莱门蒂那种坚实有力的音乐风格。

1789年,莫扎特和克莱门蒂在维也纳奥国国王的王宫里举行了世界上第一次钢琴演奏比赛,成为轰动当时的大事。这次比赛对提高钢琴在诸乐器中的地位起了重要的作用。至19世纪,钢琴最终登上"乐器之王"的宝座。

从钢琴的演进过程可以看出,早期乐器改良总是朝着两个方面发展:第一在音响性能上,追求更宽广的音域、更丰富的音色变化和更大的音量变化范围(亦称动态范围);第二在操作性能上,则追求更合理、方便的演奏方式,以满足作曲家和演奏家表现更复杂、多变音乐技巧的需求。随着时代发展,又有一些因素开始进入乐器改良者的视野。譬如,随着乐器商品化进程的发展,乐器的性能与价格之比(简称"性价比")也成为乐器改良者加以考虑的一个因素。

---

[1] Stanley Sadie. *New Grove Dictionary of Music and Musicions*. Edited by Sadie. S.Lordon: Mcmillam Press, 1980.

第四节　我国民族乐器的改良简况

我国民族乐器在世界乐器宝库中占有相当重要的位置，探讨我国民族乐器的改良问题，无论对民族乐器发展，还是对乐器声学研究来说，都有极为重要的意义。首先简要回顾一下我国民族乐器改良的发展历史。

广义地讲，中国民族乐器改良的历史与中国民族乐器发展史一样久远，但从狭义角度看，对我国民族乐器进行比较有规模、有组织地改良工作不过是近一百年来发生的事情。据资料记载，在20世纪20年代的上海，由“上海工界协进会粤乐组”发展而成的“中华音乐会”非常注重广东音乐的演奏与传播，一些成员对广东音乐的乐器进行了较为系统地改良工作。如广东音乐名家**吕文成**将传统二弦改良成高胡，并使之成为广东音乐的代表乐器，**祝湘石**制成钢丝弦的扬琴，**甘时雨**创作了新型的锣鼓架，**何大慢**将西洋吉他改制成适于演奏广东音乐的三弦吉他[1]等。

至20世纪30年代，由**郑觐文**创建的“大同乐会”则对中国民族乐器的推广和改良作出了较为突出的贡献。1930年，大同乐会筹划制作九套中国古今各类民族乐器，每套140余件。在制作乐器的过程中，大同乐会对民族乐器的改良做了大量有益的尝试，如为增加古琴音量而改良的“增幅琴”；为了加强民乐队中、低音声部，根据潮州的二弦创制了中音拉弦乐器“弓胡”和低音拉弦乐器“幢琴”，还改良了中音弹拨乐器“大忽雷”和低音管乐器“倍司管”。大同乐会还研制出既可演奏琶音、又能像柳琴一样弹奏的“小箜篌”，以及低音筚篥、葫芦琵琶（6相18品）、杖箫、三调笛、五十弦庖牺瑟等乐器。1935年，全套乐器终告完成，曾陆续陈列在当时上海旧法租界福开森路（今武康路）的世界学院供中外人士参观。后因战乱，所有乐器被毁坏丢失，但有照片保留至今，现存上海民族乐器厂[2]。

1949年中华人民共和国成立以后，民族乐器改良工作受到了政府的重视和支持。1953年4月，中央人民广播电台民族乐团成立。翌年，在中央音乐学院民族音乐研究所（今为中国艺术研究院音乐研究所）等单位的参与下，基于对传统民间乐器进行调查研究，参照西南人民广播电台国乐队32人编制和1950年中央音乐学院演出队的成果，同时吸取了苏联的乐器改良经验，用了约一年时间，组成了一个35人左右的新型乐队，并对乐队中的传统乐器进行了系统地改良[3]，使乐队能最大限度地发挥集体功能。当时的中央音乐学院民族乐队中已经使用

---

[1] 上海文化艺术志编纂委员会与《上海音乐志》编辑部合编：《上海音乐志》，2001年第6月刊，第296页。

[2] 萧友梅：《对于大同乐会拟仿造旧乐器之我见》，《乐艺》一卷4号，1931年出版。

[3] 章晋德：《一个民族乐队的成长》，《人民音乐》，1955年第6期。

了张子锐改良的大阮、低阮和大胡[1],以增强乐队低音声部。

1954年7月,中国音乐家协会成立了乐器改良小组。同年10月,中国音协民族音乐委员会和中央音乐学院民族音乐研究所在北京召开了民族音乐改良座谈会,会议期间介绍了48种新乐器和21项改良设计方案,并组织了演奏示范。

为解决笙、笛在乐队中的转调矛盾日益尖锐的问题,1955年杨大明在传统17簧和民间方笙的基础上设计了25簧笙,1956年卢露设计了全封闭键笙,1959年马铭心改革了七孔六单键笛,1962年黄宏若研制了单、复键结合的梆笛;为加强管乐器的中、低音声部,1959年张子锐采用芦笙共鸣桶原理研制成功中音抱笙,1963年扩展开发出低音抱笙。

在筝的改良方面,1958年张子锐设计了31弦截弦变调筝;戴闯设计了踏板截弦转调筝,并首次在筝上设计了S形尾岳和尼龙丝缠钢弦;1962年,李婉芬改革成功张力储码筝;1963年,魏宏宁改革成功手移纵码滚珠的转调筝。

1959年2月,中国音乐家协会在京会员民族音乐组成立。31个相关单位及个别民间音乐家和乐器制作者共800人参加了乐改座谈会。会上展示的改革成果共143项,并用改良乐器演出了16个节目。主要乐器有:杨竞明、张子锐、郑宝恒的三种转调扬琴,黄宏若、李英的大胡、低胡,傅历山的蛇皮衬绢二胡,丁福元的牛皮二胡,姚文林的改良根卡,吴景略采用钢弦的古琴,卢露的加指板和码的古琴,张计贵的八孔六键管,孙炳麟的转盘加键笙以及王金如的改良瑟等。中央民族学院民族歌舞团还设计了全套维吾尔族乐器的改良方案[2]。

60年代初,济南军区前卫文工团民族乐队脱颖而出。他们研制了高、中、低音唢呐系列,在苗族芒筒基础上研制成了低音大筒以及云锣、仿孔府编钟、柳琴、中音柳琴和带装卸式指板的坠二胡等。

这一时期还出现了完全用少数民族改良乐器组成的乐队。如1961年,伊犁哈萨克自治州歌舞团研制了由最高音、高音、中音、次中音、低音等五种冬不拉组成的乐队,总音域从大字组D至小字三组的b[3]。

缺乏适用的低音乐器一直是困扰民族乐队的难题。1964年前后出现了一批膜振动、板振动或这两种振动方式结合的改良低音拉弦乐器。其中有四弦大胡、大四胡、低音四胡、低音根卡、大扎木聂[4]、杨雨森的板皮协振式革胡[5]等。

---

[1] 孙克仁:《我国民族管弦乐队结构体制的形成和沿革》,《中央音乐学院学报》,1982年第1期。

[2] 上海音协编辑:《中国音协在京会员民族音乐组成立》,《音乐通讯》,1959年第1期。

[3] 《民族乐器改良参考资料》,1964年第1辑。

[4] 杨雨森:《革胡的革新》,《乐器科技简讯》,1975年第2期。

[5] 参见《乐器科技简讯》,1972年~1973年度各期。

十年动乱期间(1966~1976),乐器改良工作虽受到一定冲击,但并未停滞,与“样板戏”有关的乐器改良工作甚至还取得了较为突出的成果。例如出现了**戚正国**、**史金生**改革的双筒四弦京胡、京二胡,抑制噪音的人造皮膜,可调节皮膜张力的板鼓,52音键盘排笙,月琶和扩音笙 等改良成果。

20世纪70年代,文化部于1971年成立了琴、筝、瑟改革小组。自营口乐器厂研制了手控张力转调筝后,相继研制成功的还有苏州民族乐器一厂的26弦五声音阶、41弦七声音阶踏板截弦转调筝;陕西艺术学院的25弦五声音阶踏板张力式转调筝;**张琨**的踏板移码式转调筝[1]。拉弦乐器方面则有四川音乐学院的双千斤二胡,**吕伟康**试制的扁筒高胡、二胡、中胡系列和小、中、大、低音拉阮系列以及**林翔飞**设计的四弦胡琴。

1978年以后,乐器改良工作面临新的形势。一方面,乐器改良经费日趋减少造成诸多不利因素;另一方面,由于学术气氛的活跃,大量音乐文物的出土或发掘以及对民间音乐、民族乐器的收集、整理工作都为乐器改革开拓了新的途径。同年7月,文化部设立科学技术局,后来的发展证明,该局对民族乐器改良工作者而设立的奖励制度对民族乐器改良工作起到了积极推动作用。一些获奖的乐改项目在后来的民族乐队中发挥了重要作用。

1981年9月,由中国音协民族音乐委员会、文化部科技局、北京乐器学会联合主持,在苏州召开了全国民族管乐器改良座谈会。共60个单位116人出席了会议,展示的改革乐器110件,不少成果与60年代相比,无论在设计构思还是性能效果方面都前进了一大步。会后在上海组织了笛、笙联合设计小组[2]。1984年5月,文化部艺术局、轻工业部第二轻工业局联合在苏州召开了全国民族拉弦乐器改良工作会议,展出成果20余项。会上针对民族拉弦乐器存在的问题组织了讨论和专题研究,就协作攻关制定了一系列措施。

这一阶段的乐器改良工作还有一个突出点,是少数民族乐器和乐队的开发日益受到重视。仅1981年全国少数民族会演中涌现的就有:云南省歌舞团研制的加键巴乌、瓦族乐手研制的十音竹琴、基诺族的五音“布姑”(竹筒)、朝鲜族的加键筚篥、福建高山族的七根一套的乐杵和整套竹律筒[3]。1982年,内蒙古赤峰市歌舞团根据《元史》《清史稿》以及出土元代《宴乐图》和民国初年喀喇旗王爷府乐队的图片资料,发掘了喀喇沁横胡笳、瓶式竖胡笳、西纳尔胡尔、瓦尔喀毕力尔、雅托噶(筝)、火不思、马头琴、三弦等乐器[4],组成了新颖的蒙古族乐队。1986年至1989年,广西河池地区民族歌舞团的**黄仲裕**、**张颍中**设计构思的壮族乐器和乐队

[1] 陕西省艺术学院:《介绍二十四弦自动移码踏板转调筝》,《乐器科技简讯》,1975年第4期。

[2] 文化部科技局编:《文化科技简报》,1981年第13期。

[3] 周宗汉:《万方乐奏喜欢春》,《乐器》1981年第2期。

[4] 刘桂英:《多姿多彩的蒙古族乐器》,《中国音乐》,1986年第3期;毛继增:《看赤峰市民族歌舞团民族乐队的演出》,《中国音乐》,1986年第3期。

编制，包括18件一架的定音大铜鼓，20件一架的定音小铜鼓，13件一架的双音羊角编钟，8件一套的定音蜂鼓，高、中音石琴，高、中、低音琤尼、卧琤尼，高、中音牛角胡，马骨胡，高、中音唢呐，高、中音芦笙等等，组成了音响丰富又颇具特色的新颖壮族乐队。

第五节 民族乐器改良中存在的问题

讲到我国民族乐器改良中存在的问题，首先会遇到一个判别得与失的标准问题，即以什么标准来衡量乐器改良的成功与失误，没有这个标准，何为得何为失皆无从谈起。

笔者认为，归纳前人评价乐器改良工作得与失的标准，可以归结为六个字，即“音为本，乐为魂”。“音”是指乐器的声音属性，“乐”则指乐器在音乐表现力方面的性能，也就是展示音乐风格的可能性，“音”与“乐”二者之间相互关联，缺一不可，但比较而言，后者当是衡量乐器整体音乐价值的最终标准[1]。

从本质上讲，乐器是一种发音的工具，因此，声音特性——主要是音色——应当视为乐器最基本的属性，也是我们辨识一件乐器的最重要的依据。假如中国竹笛的音色经过改良后，听起来像西洋长笛的声音，那么当然会招致听众的非议。对于要保留乐器的音色特征这一点，我国的乐器改良人士似乎已经达成共识，因而在乐器改良中多数乐改者都能信守“音为本”的原则，但是在民族乐器的表现力性能方面，包括形制、音律和演奏技巧的继承方面，大家的认识却似乎“五花八门”。

早在1951年，《人民音乐》杂志上就发表过对于二胡改革不同意见的讨论。至于具体的争议主要表现在对某些改革乐器的评价上，争议的焦点集中在是否保留了传统演奏特点方面。有研究者将其概括为三种“得失观”[2]：

其一，“若有所失，宁可不得”。如琵琶采用十二平均律品位后，有人认为这样一来某些品位间距小了，有碍某些演奏技巧的发挥。但随着大多数演奏者对此类改革的接受，持这种观点者在改革成果的优越性日渐显露并占有优势的情况下，最终还是接受了此类改革。

其二，“有得必有失，力求得大于失”。对中国竹笛上用增孔和加键来齐全半音的做法争议尤甚。有人认为在竹笛上多挖孔虽会影响一些音色，但滑音技巧仍能发挥，而加键则不利于传统技巧的发挥，至于转远关系调只要换另一根笛就行了；而主张竹笛加键者认为，加键能使演奏者更容易控制音准，获得稳定、可靠的半音效果，也不妨碍大多数传统技巧的发挥，对音色的影响亦是微不足道的。

---

[1] 请注意，笔者这里使用的是“音乐价值”，意在区别于那些徒具收藏价值的文物乐器。

[2] 《当代中国音乐》编辑部编：《当代中国音乐·乐器改革》，当代中国出版社 1991 年版。

其三，“求得于最大，限失于最小”。抱笙是在芦笙的基础上改革而成的，除了重量较大外，外观、发音原理、共鸣系统、音位排列的设计都较合理。但是也有人认为抱笙与芦笙相比已面目全非，音色只是近似于芦笙，运指方法也与芦笙不同，等于创造了一种新乐器，很难说是继承了传统，其优点只是充实了乐队的中、低音。

上述三种“得失观”是对20世纪80年代以前乐器改良观念和策略的归纳，还没有触及评价得与失的标准。

1954至1955年，当时在中央音乐学院民族音乐研究所工作的李元庆先生曾发表《谈乐器改良问题》和《谈乐器改良的原则》[1]两篇很有份量的文章，对当时中国民族乐器改良的成绩和问题进行了概括性总结，并对乐器改良工作的发展提出了一些颇为有益的见解。有些原则，如要“保存和发扬原有乐器的民族特点”“注意对兄弟民族乐器和古代乐器的改良”，对今天的乐器改良工作依然具有重要指导意义。但限于当时的国内、国际形势（主要是五十年代中国与苏联的密切关系），文中的一些观点和引用的实例在今天看来并不符合“保存和发扬原有乐器的民族特点”的原则。例如，文章强调民族乐器采用十二平均律和国际音高的重要性，其理由是要“接受苏联改良乐器的先进经验”[2]。再如，文章开始很重视民族乐器演奏技巧的重要性，认为：

仅就乐器本身来说，中国乐器的特有的演技、音色、形制、音律构成了它的民族特点。其中，演技（包括演奏的风格）是最主要的。乐器的民族特点是要通过作品的演奏才能表现出来的。它是在悠久的艺术实践中经过无数艺人的努力逐渐形成的，并且对于中国古典音乐的民族风格起了重大的影响。如果说我们改良乐器是为了更好地继承和发扬民族音乐的优良传统，那么我们就应该注意把原有的优秀的演技继承下来，并且利用经过改良的乐器的优点，更进一步地去发展它[3]。

然而，在后面举出的例子中，作者又同意把玻姆式长笛的键加到中国竹笛上[4]。竹笛加键后，虽然音色没有产生变化，但其在音乐表现力方面却会发生一些变化，譬如传统笛曲中的滑音、抹音技巧在加键笛中就无法展现，而这些技巧又是体现中华民族音乐精华不可或缺的基本要素。从这个角度讲，把玻姆体系加到中国竹笛上必然会影响乐器原有的音乐表现力，从保护传统民间乐曲演奏的角度来说，这恐怕难说是改良之举。

如果以“音”（声音属性）和“乐”（音乐表现力）这两大基本要素来考量我国20世纪乐器

[1] 李元庆编：《民族乐器改良文集》，音乐出版社1962年版，第4~22页。

[2] 李元庆编：《民族乐器改良文集》，音乐出版社1962年版，第18页。

[3] 李元庆编：《民族乐器改良文集》，音乐出版社1962年版，第17页。

[4] 同注释[3]。

改良就会发现，凡“音”“乐”皆备的改良乐器在今天都已受到音乐界的认可且得到广泛应用，而不具备或不完全具备这两个特征的改良乐器则基本处于乏人问津的状况。这也给有志从事乐器改良工作者一个提示，在从事改良工作之前，一定认真思考一下计划方案是否能够让乐器在声音和音乐表现力方面都得到改进。如果是，那么就可以放心大胆地去做；如果有一方面性能可以得到改善，而另一方面性能保持不变，那么你的工作虽然可以继续进行，但成效可能并不显著；如果有一方面性能可以得到改善，而另一方面性能却可能劣化，那就要重新考虑你的方案，因为你的工作并不能使乐器整体性能得到真正“改良”。

除了声音和表现力之外，乐器的理化性状、色泽和造型也会对其能否进入演艺领域产生直接影响，因与乐器声学无关，故在此不予讨论。

章后思考与讨论题

1. 从音乐声学角度看，乐器可分解为几个部分？

2. 乐器声学构成不完整的乐器能否用于实际演奏？为什么？

3. 目前常用的乐器分类法中哪一种更靠近音乐声学规范？创立者是谁？这种方法是否存在不足之处？

4. 纵观历史，乐器的改良总是朝着哪些方面发展？目前使用的乐器还有改良的必要吗？请举例说明。

5. 我国民族乐器在声音的表现力方面还存在哪些不足？应当如何改良？请举例说明。

第十章　管乐器声学特征

第一节　管乐器发音原理概述

管乐器是所有以空气作为振动体的乐器的总称。在萨克斯－霍恩博斯特尔分类法中称为“气鸣乐器”。

就目前的考古发现而言，世界上最古老且形制完备的管乐器出现于我国河南舞阳地区贾湖村，是我们的先人用丹顶鹤尺骨制作的管乐器，距今已有8000多年的历史[1]。

世界上的管乐器种类繁多、形态各异，从音域宽至9个八度、体积庞大、控制机件繁多的管风琴，到长度不足10厘米、由一根短小竹管制成的口笛，从银光闪烁、威武雄壮的铜管乐器家族，到古色古香、形细音柔的江南笛箫，都属于管乐器的范畴。由于气体难以被肉眼察觉，因此给人们直观地了解管乐器的发声原理带来了一定困难。另外，从声学角度讲，管乐器的发声过程的确要比其它乐器要复杂一些。

概括讲，管乐器都是以管内或腔内空气振动来发声，但如何使空气振动起来，即所谓激励方式，不同乐器之间有所区别。总体上可归为三大类：边棱音激励、簧片激励和唇激励（后面将分类介绍）。

所有管乐器的演奏，首先都是由不同的激励方式带动管乐器内的空气柱产生振动，然后通过各种调控机件改变空气柱的长度、强度和持续时间，从而使管乐器有了音高、音强和音长的变化。还有一类管乐器，共振体不是“管”而是“腔”，如中国古代乐器“埙”，这类乐器主要是通过腔体空气容积的变化来改变音高。影响管乐器音色的因素较为复杂，最基本的因素来自激励方式、乐器材料和开管闭管类型。

为便于更好理解后面的内容，首先需要了解几个与管乐器发声原理有关的专门术语。

一、耦合

一般情况下，管乐器激励声源的振动频率，如边棱音的频率、簧片的频率和嘴唇的频率，与管乐器内空气柱的振动频率并不一致，前者的频率受气流的强度、喷射角度以及振动体质量的影响，后者则取决于管体的长度或体积的大小。当激励声源的振动激发起空气柱振动时，二者

[1] 《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报》，《文物》1989年第1期，第1~14页。

在振动频率上会发生相互调制，这一调制过程就称为耦合。在耦合的过程中，空气柱的振动频率起主导作用，这一点与其它种类乐器有很大差异。对弦乐器或大部分打击乐器来说，声源的音高就是所发乐音的音高，例如对小提琴来说，琴弦是声源，那么琴弦的振动频率就决定了这把小提琴的音高。同样，对定音鼓来说，鼓膜是振动源，那么鼓膜的振动频率也就是这架定音鼓的音高。而管乐器却不然，它的音高绝大多数情况下不是由振动体来决定，而是由共振体——管子的长度来决定。

二、开管、闭管、半闭管

“开管”（Open pipe）是指两端开口的管乐器，从一端送气发声；“闭管”（Closed tube）则指一端开口，另一端封闭的管乐器，从开口端送气发声。

开管与闭管在声学上的区别在于由于闭管的一端被封闭，空气柱在封闭端不能送出，而是被反射回另一端。因此，对于同样长的管子来说，闭管的空气柱长度，即波长要比开管长一倍（见图10-1、图10-2）。

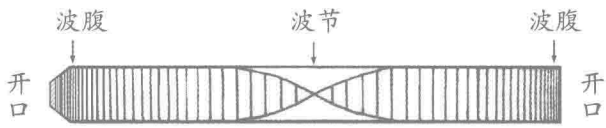


图 10-1　开管空气柱振动示意图

图 10-2　闭管空气柱振动示意图

前面我们已经介绍过，音高与波长成反比关系，波长越长、音越低。由此可以推导出，同样长度的管子，闭管要比开管低一个八度。我们可以用一个两端开口的圆珠笔管做实验：用嘴在一端吹响这个笔管，当另一端处于开放状态时是一种高度，如果用手将另一端堵住，音高马上低一个八度。管风琴的低音管通常要用闭管来制造，就因为发同样的音高，闭管所用的管长仅为开管的一半，由此可以节省很多原材料和安装的空间。

此外，开管和闭管二者产生的谐音列情况也不一样：开管能产生与基音成整数倍的谐音列，而闭管只能产生与基音成奇数倍的谐音列，即如果设基音的频率为 n，开管的谐音列为 2n，3n，4n……闭管则为 3n，5n，7n……由于谐音列与音色感觉有关，因而开管与闭管在音色上有明显区别。常见的管乐器中，长笛、竖笛、双簧管、大管、萨克斯、唢呐等，都属于开管乐器。

单簧管从形状上讲应属于开管，但其所发的谐音中，奇数倍谐音很强，偶数倍谐音很弱，具有闭管谐音列的特征，因而在音乐声学领域称之为“半闭管”（Semiclosed tube）乐器。

三、空气柱振动频率公式

“空气柱”指管状物中的气体振动时形成的气柱，它的长度对管乐器的音高起决定作用。对一根两端开口的管子来说，其两端是波腹，中间是波节，因此一根管的基音的波长实际相当于管长的2倍。对闭管来说，由于有一端被封闭，只能形成波节，不能形成波腹，那么，空气柱长度比开管还要长一倍，因而闭管基音空气柱的长度是管长的4倍。

对一根理想的管来说（即直径一致、内壁光滑），空气柱振动的频率（f）变化公式为：

$f=\frac{v}{2L}$（开管）

$f=\frac{v}{4L}$（闭管）

公式中，v 是声速，L 是管长

由上面公式可看出：空气柱振动频率与管长成反比，与声速成正比。

此外，比较开管和闭管的公式可以看出，若想发出同样频率的音高，闭管的管长要比开管短一倍才行。

四、超吹

“超吹”（Overblowing）是指用调节嘴唇形态和气息手段使管乐器发出高于基音的其它音的吹奏方法。其原理与在弦乐器上演奏自然泛音相同，都属于用一定方法抑制基音突出泛音。例如，某一管乐器的基音为 C 音，用超吹技巧（一般为紧缩嘴唇，加强气息）就能发出其谐音列中居前的其它谐音，即 c、g、c^1、e^1、g^1 ……有些管乐器，如小号、长号、圆号等，由于构造的原因，不用超吹亦能发出比基音高八度的泛音。

第二节　管口校正

严格讲，空气柱振动的长度并不等于管长的二倍（开管）或四倍（闭管），而是略大于上述数字。这是因为空气柱振动惯性的作用，波腹的位置会略溢出于管口的缘故。同样，在吹口处，由于口腔不能使管口完全闭合，造成波腹的位置也会超出吹口（参见图10-3）。

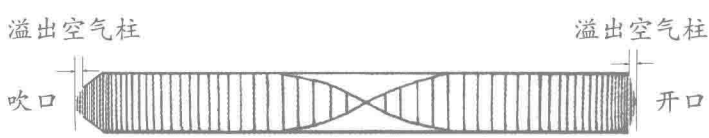


图 10-3　空气柱溢出管口示意图

由于这个原因，假如把一根管均分为二，其发出的音高并非是原管的高八度，而是一个偏低的音。因此，凡造管乐器，在计算管长的固有频率时，都需要考虑空气柱溢出的问题，音乐声学称之为“管口校正”（End correction）。也就是要根据空气柱“溢出”的那一部分来校正管子的长度，以使管子发出预想的音高。对于开管乐器来说，吹口和开口都需要加以校正，而闭管则只对吹口端加以校正。

古代对管口进行校正采用的方法有两种，一种是稍微缩短管长，另一种是缩小管径。中外音乐家和科学家，对这两种方法都做过尝试，其中尤以中国古代科学家和乐律学家对此问题研究得最为深入，这是因为中国古代宫廷非常重视乐律问题，特别是对吹律定音所用的律管（相当于今天的音叉或定音仪），历代朝廷都有专人监管，而制造律管就一定会碰到管口校正问题。

由于演奏方法、管长、管径、管子内壁的光滑程度和管子材料的弹性模量等因素都会对空气柱的长度产生影响，所以要找到一个“放之四海而皆准”的管口校正公式几乎不可能。以下几个公式都属于“经验公式”或“实验公式”，即只有符合特定的条件才有效的公式。

一、管长超过管径八倍以上的管

下面是比利时声学家马容（V.Mahillon，1841~1924）提出的管口校正公式[1]，此公式仅适用于管长超过管径八倍以上的管：

闭管管口校正数≈ r（管的半径）

开管管口校正数≈ $2r$（管的直径）

现举例说明，假如有一根开管的管长30厘米，管直径为2厘米，现求这根管的基音高度。

首先根据开管管口校正数公式，可以求出这根管的管口校正值为2厘米。根据前面的开管的频率公式：

$f=\frac{v}{2L}$（v= 声速，L= 管长）

再将开管的管口校正数（2厘米）加在管长上：

$f=\frac{v}{2(L+2)}=\frac{34000}{2(30+2)}\approx 531$ 赫兹

查频率与音名对照表，可知这根管发出的音高约为 c^2+2音分。

二、内壁光滑、无指孔的管

下面是音乐声学家罗兴给出的管口校正公式[2]：

---

[1] 缪天瑞：《律学》年第3次修订版，人民音乐出版社1996年版，第10页。

[2] Thomas D. Rossing . *The Science of Sound.* Addison-Wesly, 1982: 52~53.

闭管管口校正数＝0.61r（r是管的半径）

开管管口校正数＝2×0.61r

与马容的公式相比，罗兴的管口校正数要稍小一些。如仍以前面举例的管子来计算，得到的频率约为545赫兹，对应的音名为$^{\sharp}c^{2}-30$音分。

三、有指孔的管（荀勖笛）

荀勖（？~289），字公曾，颍川颍阴（今河南许昌）人。是中国古代宫廷中掌管音乐事务的官员。据史书记载，晋泰始十年（公元274年），荀勖"谨依典记，以五声、十二律还相为宫之法，制十二笛"[1]。荀勖笛类似今日洞箫，竖吹，共有六孔，前五孔，后一孔。

荀勖的重要贡献在于首次发现了有指孔管的管口校正数。荀勖笛的管口校正公式为：

管口校正数＝该笛命名律的律长－比命名律高四律的律长[2]。

以黄钟笛为例，当时规定该笛的长度为9寸，比它高四律的姑洗律的长度为7.111寸，套用上面的荀勖公式，则管口校正数为9−7.111≈1.89寸。

我国笛律研究专家陈正声先生曾根据荀勖的管口校正公式复制荀勖黄钟笛和仲吕笛各一支，认为"黄钟笛除商音偏低外，其余各音音准都很好，而且合律"[3]。

第三节　边棱音管乐器

以边棱音作为激励源的管乐器，称为边棱音管乐器。常见的边棱音管乐器有长笛、短笛、竹笛、箫、埙等。

当一股气流以一定角度射向一个带有尖锐边缘的管子入口时，气流就被分为两股，形成上下两个分离的气体涡漩，涡漩之间随之产生空吸，导致相互碰撞。如果气流不断，涡漩之间的碰撞也就会持续下去，涡漩碰撞发出的声响就称为边棱音。边棱音的作用在我们生活中屡见不鲜，例如普通人吹的口哨，笛子和箫等乐器的发声以及人的歌唱等，都与边棱音发声有紧密的联系。

边棱音的频率变化，关键取决于气流对边棱喷射的角度。在边棱音产生的许可范围内（要根据边棱角的情况而定），角度越大，频率越高，这是因为射流的角度越大，边棱处涡漩的碰撞次数就越多，频率就越高（见图10−4）。

---

[1] 《晋书》卷十六《律历志》第二册，第483页。

[2] 这里的"律"指律管，"律长"即指律管的长度。

[3] 戴念祖：《中国物理学史大系——声学史》，湖南教育出版社2001年版，第261页。

在一定条件下，流速越快，对边棱施加的力越大，振幅越大。流速加快会引起超吹现象（即抑制了基频，突出了某一泛音）。如果流压过强，使管内气压大于大气压力，就会失去边棱音效应而导致哑音。

图 10-4　边棱音发声示意图

在音色特点上，单纯的边棱音是一种很弱的、嘶嘶的声音，本身发出的声响很小，而且含有较多的高频噪声，只有通过共鸣腔体的耦合，声音才会变大，音色也会变得圆润。我们平时很难听到纯粹的边棱音，是由于边棱音总是同空气柱（或腔）的振动耦合在一起，所以很难单独测定边棱音的音质特性。譬如，当我们吹响一根空的管子，这时产生的声音已经是边棱音和管内空气柱混合发出的声音，边棱音被淹没其中。

边棱音激发起共鸣管空气柱的振动，空气柱又反过来使边棱音离开自己的固有频率，这就是边棱音乐器的耦合过程。在耦合之前，边棱音比空气柱音高1~10倍；在耦合的过程中，空气柱不仅将边棱音频率拉低，而且掩盖和削弱了边棱音中不谐和的泛音，使音色富有美感。

对熟练的演奏者来说，耦合过程是在很短的瞬间完成的；而对一个新手来说，耦合需要一个稍长的过程，因而显得发音犹豫、不稳定。

除了典型的边棱音乐器外，边棱音效应在所有管乐器上都或多或少地起作用，如唇管乐器、簧管乐器、管风琴和人声乐器等，都与边棱音振动有密切关系。边棱音既可以美化它们的音色（减弱不谐和泛音的振幅），也可能丑化它们的音色（增加不谐和的成分）。特别是当它处于强迫振动地位时，将出现极为复杂的共振现象。

边棱音管乐器一般用两种方法来改变音高：一种是将不同长度的音管排列在一起，需要什么音就吹奏相应的管，如排箫和管风琴就采用这种方法；另一种是在一根音管上开若干音孔，用手指（或按键）开闭音孔，改变空气柱的长度从而发出不同的音高，这是多数边棱音乐器所采用的方法，如竹笛、箫、长笛等。

还有一种吹管类乐器，边棱音不是与管状体而是与空腔体耦合，例如中国民族乐器“埙”。相对于管状管乐器而言，这类腔状管乐器在音高变化上，是通过改变共鸣腔体空气容积量和开口的面积来体现。具体讲，容积量越大，或者开口面积越小，振动频率越低，音也就越低，反之则越高。以埙为例，其筒音的高度主要是由腔体大小来决定，而要吹出各种音高变化，则要通过在腔体上开一些大小不等的孔来完成，打开大的孔可以发出较高的音，小的孔发出较低的音。

所有边棱音管乐器（不包括腔体类型），其共鸣管均属开管类型，属于八度超吹乐器，也就是说在不改变按孔位置的情况下，只要改变射角和流速就可以抑制基音而奏出高八度的泛音。

除了运用八度超吹的奏法来获得第一泛音外，还可用改变仰角轻吹的办法来获得第二泛音（即上方八度加纯五度）。我们不妨把这种泛音称为“人工泛音”。这种泛音音量虽小，但音色纯净，接近纯音。

边棱音管乐器可以像弦乐器揉弦那样奏出波动音，其方法有两种：一种以嘴唇的轻微颤动来促使射角与射流的周期变化，这样产生的波动音是频率的轻微起伏。第二种是以横膈膜和腹肌轻微颤动来促使气流发生周期颤动，这样产生的波动音是振幅的轻微变化。有时也可以将上述两种方法结合运用，效果更佳。

民族边棱音管乐器可以采用改变吹角和抹音孔的办法，获得滑音效果。在加了键的竹笛上，因音孔被音键覆盖，无法使用抹音孔方法，故而很难奏出滑音效果，直接影响民族音乐风格的表现。

第四节　簧管乐器

以簧振动作为振源的管乐器，称为簧管乐器。常见的簧管乐器如单簧管、双簧管、唢呐、管子、笙等。

乐器上的簧，是指用金属或植物制成的弹性薄片。一端被夹在共鸣腔体的封口处或簧室内，另一端不固定。当气流通过封口或簧室时，簧片就会产生振动而发声。同边棱音乐器相似，簧片振动产生的声音很小，且含有较多的高频噪声，因而也需通过共鸣腔体的耦合来扩大音量，改变音色。

从音乐声学角度讲，演奏簧管乐器时，音高变化主要由共鸣腔体的长度或体积，以及簧体的体积和质量决定，音量变化主要由气流的速度决定，音色变化则主要由演奏者吐气的方式决定。

从振动方式上讲，管乐器的簧有两种，一种是自由振动式簧，如笙、口琴和手风琴中的簧都属于此类。这种簧固定在共鸣管封口的中间，无论进气还是出气，都能激发簧的振动而发声（见图10-5）。

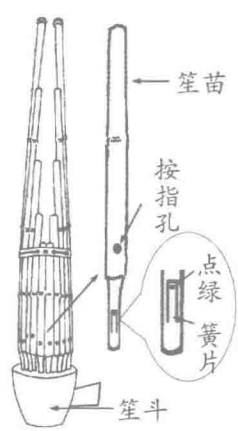


图 10-5　民族乐器—笙簧片结构示意图

另一种是拍打振动式簧，如单簧管、双簧管、唢呐等乐器上的簧片均属此类。这种簧片安在管的封口的上边，振动时经过平衡点作不等距振动，称为拍打式振动。这种簧只能在进气时激发簧的振动而发声（见图10-6）。

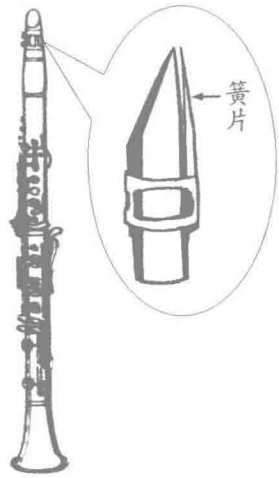


图 10-6　单簧管簧片结构示意图

理论上讲，可以把簧看作扁形的棒，其基频计算公式可借用棒的公式来推演：

$fn=(2n-1)\frac{c}{4L}(n=1,2,3,\cdots)$

公式中，c 是棒的纵振动传播速度 $=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$（E 是物体弹性模量，ρ 是材料密度），L 是棒的长度

从上式可以看出，棒的振动频率与棒长成反比，与棒振动速度成正比；而棒振动速度又与棒体的弹性和材料密度有关，因此可以推导出簧振动的频率，取决于簧舌的长度、弹性模量和材料的密度，簧舌越短、弹性越强、密度越低，振动的频率就越高，反之则越低。改变上述三个因素中的一项，就能改变簧片发音的高低。

我国的民间艺人在为笙调音时，采用往簧片上“点绿”的方法，就是在簧舌上点一点儿矿物质，由此改变簧的弹性模量，达到调节音高的目的。这种技巧早在1972年长沙马王堆汉墓出土的竽上，已经体现出来。

为口琴、手风琴的簧片调音时，如果声音偏高，往往在发音偏高的簧片根部（固定端）削去少许，也是为了降低簧片的弹性模量，使频率下降；如果声音偏低，则在簧片顶部（自由端）削去少许，使簧片变薄，增强弹性模量，使频率上升。

簧振动所产生的泛音列同基础音之间的关系是不谐和的。对于理想的自由式安装的均匀的矩形簧片，其第1、2、3泛音分别比基音高6.27倍、17.6倍和34.4倍。泛音与基础音之间的频率关系都不是整数倍关系，如果是拍打式双簧片的振动，频率关系还要复杂。因为两片簧

片的制作，无论如何精细也无法完全一致。簧管乐器之所以能发出准确的音高，主要得益于共鸣体的耦合作用。双簧管的演奏者都有这样的体验，当单独吹双簧哨子时，发声刺耳嘈杂，然而把哨子插入双簧管再吹奏时，声音马上变得悦耳了。这是因为通过共鸣管的耦合作用，簧振动中的不谐和成分被加以“纠正”。

同边棱音乐器改变发音高度的方法一样，簧管乐器也是采用一管一音（如笙、管风琴）或一管多音（如单簧管、双簧管）的办法来产生不同的音高。其中绝大多数一管多音的乐器都属于开管乐器，它们也是八度超吹乐器，只有单簧管例外，从其谐音列角度看，它属于半闭管乐器。利用超吹获得的第一个泛音不是八度，而是八度上加纯五度（十二度）的音。也就是说，吹奏单簧管低音区时，在同样指法的情况下，只要按动泛音键即提高一个十二度。

我国少数民族，如苗族和彝族经常吹奏的芦笙，也有一管多音的演奏方式。这种笙的特点是“笙苗”（即笙管）穿过笙斗而出（见图10-7），不像北方的笙是插在笙斗之中。

这样，一根笙苗实际上就等于有三个开口（上下两端和一个按指口）。手指按住按指孔，此时笙苗相当于一支长的开管；如果松开按指孔，相当于一支较短的开管；如果同时堵住笙苗下端和按指孔，此时笙苗相当于一支闭管。这样结构的笙可以用较少的笙苗发出较多的音，确实是一种聪明的做法[1]。

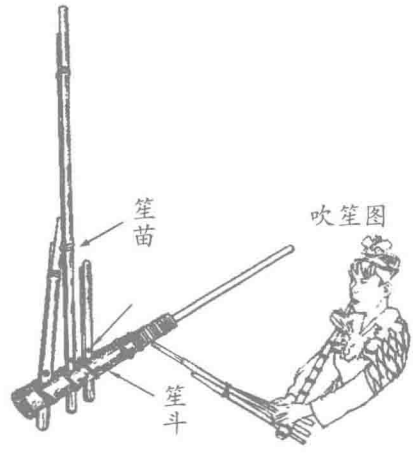


图 10-7 芦笙构造及吹笙示意图

簧管乐器所用的簧片，除我国的笙簧多用铜制外，更多的是用植物的茎，如芦苇秆或麦秆制成。曾有人用其它材料，如塑料制作簧片，但音色尚不理想。国内外簧管乐器演奏家，一般都自己动手制作簧片，因为在制作时可以充分顾及自身的嘴形、技巧和演奏习惯，从而能达到最佳的音乐效果。了解簧振动的一般规律，有助于演奏者加工和改良自己的簧片。

经过训练的演奏者，可采用循环换气法而作不停歇的吹奏。这种方法，是用口腔蓄气并保持一定压力然后用鼻孔迅速吸气，使演奏得以连续进行。同边棱音管乐器一样，吹奏簧管乐器时，轻轻颤动嘴唇，配合腹肌的周期起伏，可以发出波动音。

运用口型的控制，逐渐改变簧片的振动频率，可以获得滑音效果。美国作曲家格什温（G. Gershwin,1898~1937）的《蓝色狂想曲》，在开始一段单簧管的独奏中就使用了半音上行滑音，达到很好的艺术效果。

[1] 沙玛瓦特：《彝族吹管乐器—葫芦笙的历史与现状》，《中国音乐》，1997 年第 2 期，第 65~66 页。

第五节　唇管乐器

以嘴唇振动作为激励源的乐器，称为唇管乐器。常见的唇管乐器有小号、长号、圆号、大号、筒钦（藏族、蒙古族大型吹奏乐器）等。

唇管乐器的发音原理是：空气通过双唇间的缝隙喷入号嘴时，双唇会产生振动而发声，唇的振动经过共鸣管的耦合得以增强，共鸣管长度的变化可以改变音高和音色，最后通过喇叭形的号口将声音传出。

理论上讲，唇振动与簧振动原理是一样的，可以把双唇类比为肌肉制成的簧片。演奏唇管乐器时，音高变化主要由共鸣腔体的长度或体积，以及双唇的形态决定，音量变化主要由气流的速度决定，音色变化则主要由演奏者吐气的方式、是否加弱音器等因素决定。

从总的结构讲，唇管乐器大致可以分三个部分，即激励部分（嘴唇），共鸣部分（管体）和控件部分（如按键、弱音器等）。

唇的振动激起号管内空气柱的振动，空气柱的振动频率又反过来调整唇的振动频率，两者进行耦合。唇振动和空气柱振动的耦合不是自然完成的，需要吹奏者对嘴唇紧张度进行控制。吹奏低音时，嘴唇（包括整个口腔肌肉）要相对松弛，随着音的不断升高而逐渐绷紧。在这方面，唇振动和簧振动有明显的区别，唇如同可变张度和劲度的簧，而普通的簧片没有这种可能。

如同簧振动一样，唇的振动也是以横振动为主，它的泛音与基频的关系是不谐和的，而空气柱以纵振动为主。因此，耦合的过程亦即将横振动转变为纵振动的过程。在这个过程中，唇的固有频率被拉低了，削弱了不协和泛音的振幅，突出了谐和的成分。但是横振动仍产生作用，特别是铜管乐器中，横振动所产生的高频泛音是金属声音色彩形成的主要原因。

号嘴的作用，主要是固定嘴唇振动的范围。不同音高的唇管乐器，有不同长度和内径的空气柱，而唇的宽和长亦要同空气柱相适应，所以号嘴的内径亦有大、中、小之分，与不同的唇管乐器相配合。

在同一件乐器上也可以有不同内径的号嘴。国外一些爵士乐队往往采取在降 B 调小号上安装降 E 调小号号嘴的方法，来缩小嘴唇振动的范围，从而不费力地奏出第10、11、12、13等泛音，但在演奏第1、2、3泛音时，则因为这种号嘴内径小，嘴唇振动与低频不适应，音色发空。遇到这种情况，往往需要由另一小号手演奏中、低音。

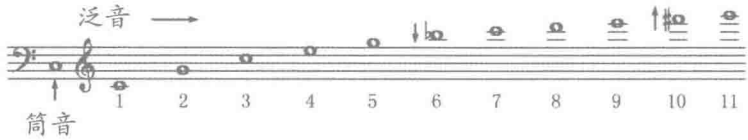
号嘴的另一功能，是改变音色。这是因为嘴唇振动时，振动气流还会在号嘴内产生涡漩而引起边棱音效应。内径形状不同的号嘴，边棱音振动分量亦不同。

同弦振动一样，开管空气柱在全段振动时，也均分为1/2、1/3、1/4 …… 1/n 段，各段同时

振动，产生的自然泛音列与弦振动是一样的，所以唇管乐器的吹奏者，在不按动活塞的情况下，只要改变嘴唇的紧张度，用超吹的方法就可以在唇管乐器上奏出自然泛音列。

现以降 B 调小号的基础音管（长 1.335 米）奏出的泛音列为例：

谱例10-1　降 B 调小号基础音管奏出的泛音



一般的乐手只能奏出前7个泛音，少数乐手可以奏出第8~11号泛音，而基础音用普通号吹不出来，其原因在于吹奏基础音时，需要嘴唇大面积并充分松弛地振动，才能与空气柱全振动相耦合，一般的号嘴无法达到这种要求。

为了使唇管乐器奏出自然泛音列以外的音，人们想了许多办法。一种办法是在号管上如同双簧管那样安上许多按键，这个办法因音色不理想而弃置了；另一种办法是让数人各吹奏不同长度的音管，这个办法因把旋律弄得支离破碎而失败；还有人使用伸缩管的办法，解决了吹奏半音问题，但演奏不够灵活而且吹奏连音不理想，不过这种方法也有它的音色特点，所以在长号上继续沿用至今。直到活塞的发明，才使唇管乐器的音高变化有了突破性发展。

活塞的使用原理是：当活塞处于原位时，空气柱在基础音管内振动发声；按下活塞后，使基础音管接通延长音管，从而改变空气柱的长度，发出不同基频的自然谐音列（见图10-8）。

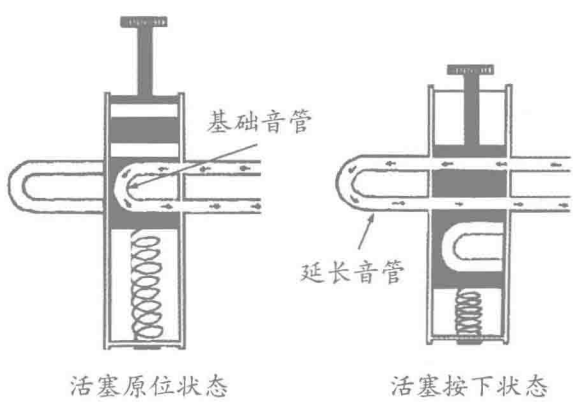


图 10-8　小号活塞工作原理示意图

小号一般有三个变音用的活塞，现在仍以降 B 调小号的基础音管（长度 1.335 米）为例。按下第一活塞，由于接通了第一活塞附加管，号管增长至 1.51 米，整个泛音列都降低一个大

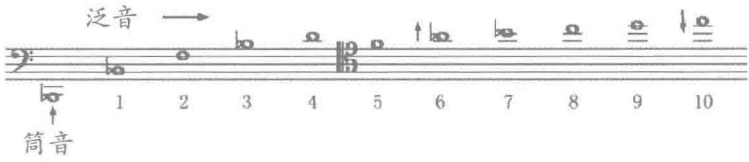
二度；按下第二活塞，第一活塞还原，号管增长至1.41米，泛音列能降低一个小二度；单按下第三活塞，或按下第一、二两个活塞，号管增长至1.59米，泛音列降低小三度；按下第一、三两个活塞，号管增长至1.75米，泛音列降低纯四度；按下第二、三两个活塞，号管增长至1.69米，泛音列降低大三度；如果三个活塞同时按下，号管增长至1.854米，则泛音列降低一个减五度。综合上述三个活塞（单独或交错）使用情况，可以演奏三个八度范围内的所有半音。

有一些铜管乐器（如大号、低音长号）装有第四个活塞，其作用是为了使整个音列降低一个纯四度。

长号一般以伸缩号管的方式来改变空气柱的长度，以获得不同的泛音列。除此之外，按键式长号在19世纪个别作曲家，如威尔第（G.Verdi，1813~1901）的作品里也经常出现，主要用于那些需要快速改变音高的音乐段落。

伸缩式长号在不变动管长的情况下（称“第一把位”），用超吹的办法可以奏出如谱例10-2中的泛音列：

谱例10-2　伸缩式长号在不变动管长的情况下，超吹奏出的泛音列



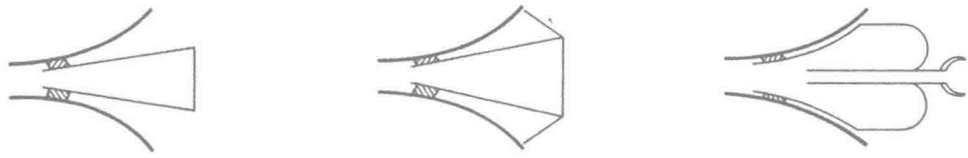
随着号管逐渐伸长，基音可以由降低一个小二度直至降低一个增四度（第七把位），再低的把位很少使用。有的长号（如中、低音两用长号）还装有一个活塞，按下活塞后，整个音列可降低一个纯四度。

弱音器是唇管乐器经常使用的附加器件。弱音器的工作原理，是在唇管乐器的辐射区（喇叭口）安上一个障碍物，使空气柱振动波不能直接向空间辐射，从而抑制了空气柱的纵振动，减弱了基频振幅，音量得以减弱。另外，共鸣腔体内的气流在通过弱音器时，会产生边棱音效应，从而增强了高频泛音，音色也随之改变，更加凸显金属音质。

唇管乐器早期的弱音器，是用棉织体堵塞喇叭口，使声辐射受到障碍，减弱了音量，还产生一种朦胧的沙沙声。后来弱音器用木料制成，近代的弱音器则多用金属或塑料制造，安装方便且音色变化亦显著。

根据音色的差异，弱音器在形制上有硬音和软音两种。硬音弱音器是一个单层闭管式的薄金属结构，高次泛音的振幅较强，发音尖锐，有明显的金属色彩，在乐队中穿透力较强；软音弱音器是双层开管式的金属结构，高次泛音的振幅较弱，音色圆润柔和，略带木管色彩，在乐队中穿透力较弱，但易于同其它乐器的音色融合。

图10-9是小号常用的三种不同形式的弱音器：



(a) (b) (c)

直式弱音器(Straight Mute) 碗式弱音器(Cup Mute) 哈蒙(哇声)式弱音器(Harmon Mute)

图 10-9 小号常用弱音器

美国音乐声学家贝克斯(J.Backus)曾专门研究过小号弱音器的声学特征，其研究成果可归纳如下[1]：

1. 弱音器可以改变小号喇叭口的声音辐射特性，特别对低频声的辐射起到很强抑制作用。

2. 由于弱音器的共振效果，在100赫兹左右会产生一个低频音，但由于该音不在小号音域范围之内，故对实际演奏效果影响极小。

3. 直式弱音器对1800赫兹以上的高频音没有抑制作用，音色听起来比较尖；碗式弱音器对800~1200赫兹的声音没有抑制作用，因此音色变化性比较强；哈蒙(哇声)式弱音器对1500~2000赫兹区域的声音没有抑制作用，故声音听起来更为尖锐一些。

此外，安上弱音器后，乐器在发音时容易偏高，这是因为缩短了空气柱长度的缘故。为要修正音高，现代新式唇管乐器都装有专为使用弱音器而设的活塞。没有这种活塞的乐器，则要拔出部分预备管来调整音高。演奏圆号时，有时用拳头堵塞喇叭口，可获得“阻塞音”，类似弱音器的音响。

唇管乐器在气息运用的原理与方法上，与边棱音乐器基本一致。有一点值得注意，相对于其它吹奏乐器，唇管乐器气息消耗量较大，在高音区演奏时则气息消耗量更大。此外，不同管径的乐器，气息消耗量也不同，管径越大，耗费气息越多。因为激发容积大的空气柱总比激发容积小的要困难一些，因此低音长号与大号在吹奏强烈音响时，往往几秒钟就得换一口气。

所有唇管乐器，利用对嘴唇张度的控制，可奏出一定的滑音效果。对长号来说，由于构造上的特点，不用嘴唇控制，演奏滑音也非常方便。亚美尼亚作曲家哈恰图良(A.Khachaturian，1903~1978)的《马刀舞曲》(《舞蹈组曲》中的一首)可谓是对长号滑音运用的经典之作。

[1] Backus. *Impedance Curves for the Brass Instruments*.Journal of the Acoustical Society. 1976，60：470.

第六节　几种常见管乐器的频谱特征

前面已经提到频谱的作用，它就像检查我们身体用的 X 光照片，可以对声音的全部内容进行“透视”。本节介绍的是几种最常见的管乐器，既有边棱音管乐器（长笛、竹笛），也有簧管乐器（单簧管、唢呐）和唇管乐器（小号、长号）。通过对这些频谱的分析和比较，读者可以从“内部”更清楚地认识不同管乐器的物理特征。

一、长笛

长笛属于边棱音开管乐器，其频谱有如下一些特征（见图10-10）：

1. 基音与泛音构成整数比的关系，即1:2:3:4……，因而其泛音列具有谐音列的性质，凡具有谐音列的音色听起来都有明确的音高。

2. 基音的强度超过其它泛音的强度，这意味着长笛的音高是由基音来决定。

3. 就前六个谐音而言，其强度包络（连接各谐音顶端而成的外形轮廓）上呈 V 字形，且自第七谐音开始，强度陡然下降，具这种频谱形态的乐音听起来会有一种空洞感，这符合长笛中低音区的音色特征。

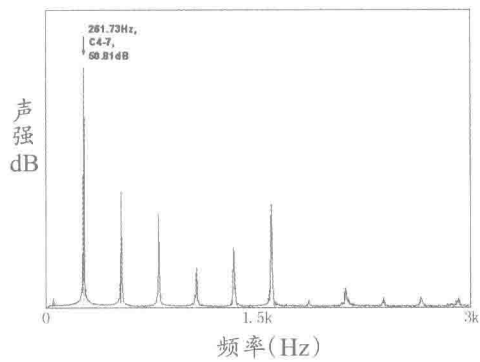


图 10-10　长笛频谱

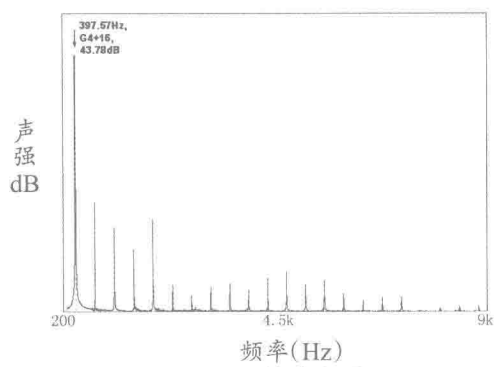


图 10-11　竹笛频谱

二、竹笛

竹笛，俗称“笛子”，是我国常用的竹制民族乐器。与长笛一样，竹笛也属于边棱音开管乐器，其最大特点是在离吹口不远处的音孔上蒙有薄薄的芦苇膜，吹奏时笛膜作强迫振动。笛膜贴的张度对音量、音色均有影响。目前常用的竹笛又有曲笛和梆笛之分，图10-11中的频谱取自曲笛的音色。

由于材料质地和构造上的差异，竹笛与长笛相比在频谱上有如下相异之处（请对照上面图10-10、图10-11的频谱）：

1. 竹笛在高音区（3000赫兹以上）谐音成分比长笛丰富许多，因此音色比长笛高亢、透亮。

2. 较之长笛，在竹笛的谐音列中，基音的能量比泛音更强一些，所以竹笛的音高感非常明确。

3. 竹笛在4500赫兹音区附近有一个凸起的泛音包络，可能与笛膜的共振有关。

三、单簧管

单簧管属于半闭管簧管乐器，与长笛、竹笛这样的开管乐器相比，其频谱有如下一些特征（见图10-12）：

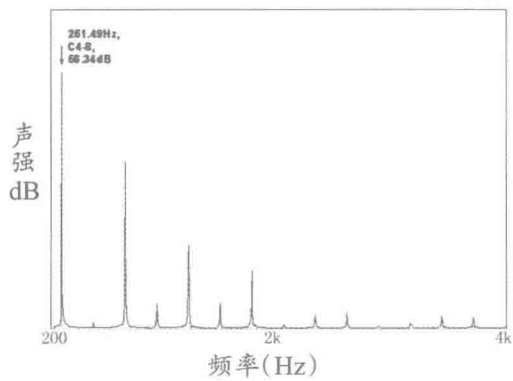


图 10-12 单簧管频谱

1. 单簧管的谐音列基音与泛音亦构成整数比关系，但在单簧管的谐音列中，奇数的谐音能量都相对较强，偶数的谐音能量较弱（注意前8个谐音），这种谐音成份听起来有一种“空”的感觉。

2. 基音的强度超过其它泛音的强度，这意味着单簧管的音高是由基音来决定。

四、唢呐

唢呐是中国民族乐器，属于开管双簧类。其频谱具有如下特征（见图10-13）：

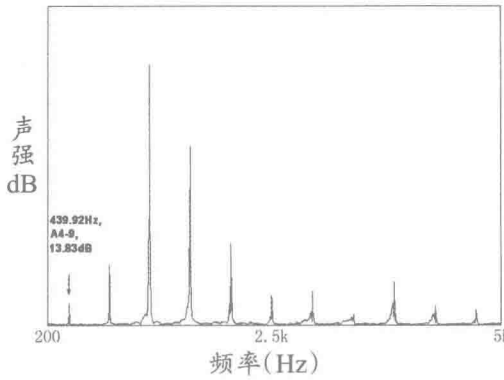


图 10-13　唢呐频谱

1. 唢呐谐音列相对来说比较丰富，在5000赫兹高音区（小字5组左右）仍有较多谐音存在。因此唢呐的音色比较明亮、高亢。

2. 唢呐谐音列有一个奇特的现象：基音能量较弱，而第2、3、4、5号谐音的强度都超过基音，其中第3、4号谐音强度非常突出，这种情况是双簧乐器的一个重要特征，譬如双簧管的频谱也大致如此（见图10-14，注意第3、4号谐音强度也非常突出）。

3. 由于唢呐谐音列中的第2、3、4号谐音能量远远大于基音，因此唢呐的音色带有较强的“鼻音”效果，这也是双簧类乐器共有的特点之一。作为比较，下面给出双簧管的频谱（见图10-14）。

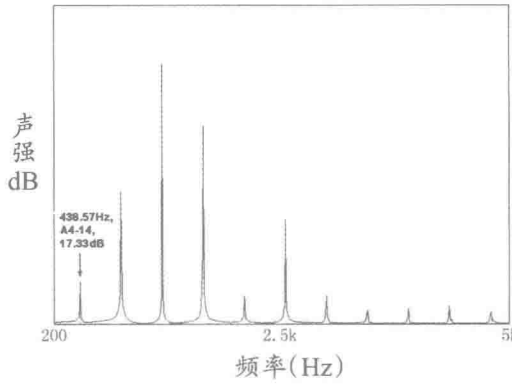


图 10-14　双簧管频谱

五、小号

小号属于唇管乐器，所有唇管乐器在频谱上都具有谐音相对较为丰富的特点，小号也不例外。从频谱上看，小号的声音具有如下特点（见图10-15）：

1. 谐音丰富，在5000赫兹（小字5组左右）高音区依然有较强能量的谐音存在，由此决定小号的音色明亮、高亢。

2. 小号的第4、5、6号谐音强于基音，处于整体谐音包络的“顶峰”，这种状况与双簧类乐器有相近之处，因为人的嘴唇实际上就是一个肉质的“双簧”。

3. 与前面介绍的木管类相比，小号谐音列中的噪音成分较多一些（见图10-15中处于底线上的杂波），由此决定小号的声音中具有一种“粗犷”的成分。

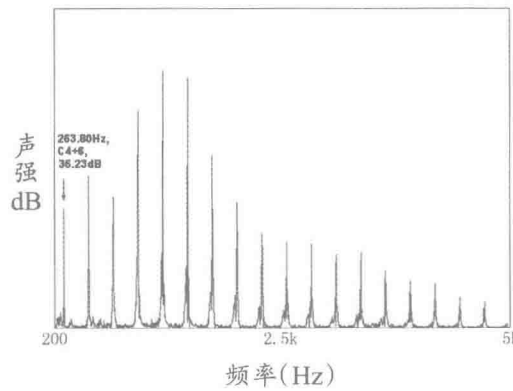


图 10-15 小号频谱

六、长号

长号与小号同属唇管类乐器，因此二者在频谱上有许多相近之处。只不过长号音区较低，因此高频谐音较少，在2000赫兹以上几乎不存在较强的谐音（见图10-16）。

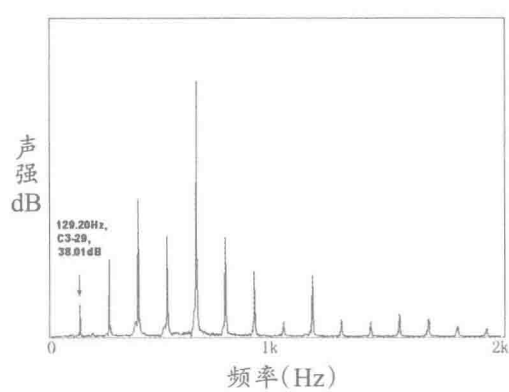


图 10-16 长号频谱

综上所述，从频谱角度看，在管乐器大家族中，铜管乐器的谐音最为丰富；在木管乐器中，我国竹笛的谐音最为丰富。

章后思考与讨论题

1. 众多管乐器可分为几种激励方式?

2. 在管乐器吹奏过程中,“耦合”起到什么作用?

3. 开管乐器与闭管乐器的区别有哪些? 为何称单簧管为“半闭管乐器”?

4. 计算管乐器发声的频率主要依据哪些要素,常用计算公式是什么?

5. 管乐器制作过程中为何需要做“管口校正”? 常用的计算公式有哪些? 它们是如何推导出来的?

6. 控制簧管乐器音高的主要因素有哪些? 请举例说明。

7. 相对其它类型管乐器,“唇管乐器”在频谱上个具有哪些特征? 其高频泛音来自哪里?

8. 用频谱分析的方法比较竹笛与长笛二者之间的差异。

第十一章　弦乐器声学特征

第一节　弦乐器发音原理概述

以弦的振动为发声源的乐器，称为弦乐器。按萨克斯－霍恩博斯特尔分类法，则称为“弦鸣乐器”。

人类大概在制造和使用弓箭的时候，就懂得了弦可以发出声响。据《诗经》载，我国西周时期已有拨弦乐器琴（今通称“古琴”）和瑟（筝的前身，今已被筝所取代）。迄今为止，我国已发掘出的春秋战国时期的瑟已有数十件之多。时代较早的有湖北当阳县曹家岗楚墓出土的春秋晚期的瑟[1]。战国时期流行的弦乐器还有筝和筑。筑是以竹尺敲击发音的弦乐器，有学者认为中国早期的弓弦乐器就是从筑演变而来[2]。

从世界角度看，最古老的弦乐器出现在美索不达米亚地区（今西亚伊拉克的大部分地区）。在那里，从公元前3000多年的乌尔国王墓葬群中发掘出了9架里拉琴，还有竖琴[3]。由此可以推断，人类利用弦乐器演奏音乐至少已经有5000多年的历史。

从只有一根弦的独弦琴到两根弦的二胡，直至有数百根弦的钢琴，弦乐器虽然形式各异，音色千差万别，但从声学角度看，任何一件完整的弦乐器都由如下基本结构组成：

1. 激励系统，如小提琴的琴弓，钢琴的琴槌，弹竖琴的手指等。

2. 弦振系统，包括琴弦和张弦装置。

3. 传导系统，如琴马。有些弦乐器传导系统和张弦装置合二为一，如竖琴、古琴、琵琶等。

4. 共鸣系统，用以加强弦振波的扩散。共鸣系统有的是板体，如钢琴的音板；也可以是一个腔体，如小提琴的琴箱。

5. 用于调整声音效果的调控装置。如调弦装置、钢琴的延音踏板，以及现代电子弦乐器的电子扩声装置等。

---

[1] 《考古学报》，1988年第4期，第45~49页。

[2] 项阳：《中国弓弦乐器史》，国际文化出版公司1999年版，第8页。

[3] 汉斯·希克曼等著：《上古时代的音乐》，王昭仁、金经言译，文化艺术出版社1989年版，第83页。

下面以小提琴为例介绍弦乐器的声学结构：

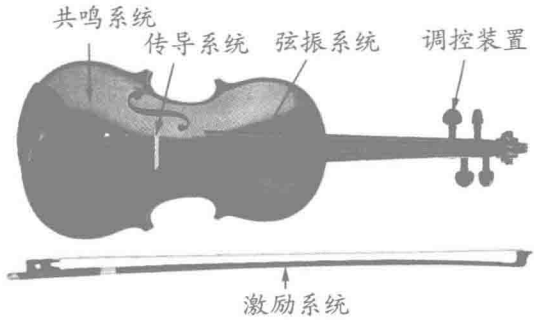


图 11-1　小提琴声学结构示意图

弦乐器的发声原理可归纳为以下几个要点：

1. 由激励装置对弦进行触发，使弦振动发声。演奏家通过改变弦长（按指或改变弦序）和激励方式（演奏技巧）来改变弦乐器的音高、音色、音强和音长。

2. 利用共鸣系统来加强弦振动的声能扩散，增大音量。一般来讲，单纯弦的振动产生的声能辐射范围有限，音量很小，因此绝大多数弦乐器都经过共鸣系统来加强弦振动的声能扩散。除此之外，由于共鸣系统可以突出某一频段的声音能量，因此共鸣系统不仅可以扩大音量，而且还可以改变乐器的音色。从这个角度看，弦乐器共鸣系统的声学性能对弦乐器音质的影响是至关重要的，所以当乐器制造师想改善一件弦乐器的声音性能时，往往都是从共鸣系统入手。

3. 利用声学调控装置对乐器发声状况，如对音长、音色和音量加以控制或改变。一般来讲，击弦乐器和拨弦乐器上的调控装置，主要用于控制音的时值，因为这类乐器的发声特点是琴弦一旦被激发后，声音不能延续或停止。调控装置所起到的作用，是对激发后的琴弦发声状态加以控制，以符合音乐作品中的时值要求。对擦弦乐器来说，由于发声状态一直被激励体（琴弓）所控制，故无需加装控制时值的调控装置。利用调控装置改变弦乐器音量和音色的例子也很多，如钢琴的弱音踏板、小提琴的弱音器都可以用来改变音量和音色。

第二节　弦振动的一般特性

一、弦振动与频率变化

从声学角度看，琴弦可视为一根具有一定张力的线体。弦乐器与管乐器之间在发声性能上最大的差异在于：弦乐器发音的音高就是由振动体——弦的振动频率决定的，共鸣体只是起到扩散声能的作用；而管乐器发音的音高是通过振动体和共鸣体的耦合来决定，共鸣体往

往掌握更大的“音高决定权”。从这个角度看，只要了解弦振动的一般特性，就能够掌握弦乐器在音高变化方面的规律。

首先来介绍弦的振动方式。当一根弦受激振动时，会同时产生三种不同类型的振动，即横振动、纵振动和扭转振动。弦的横振动，可以简单地理解为弦的上下振动，是最主要的一种振动方式，横振动的能量最大，对弦振发声起主导作用；纵振动，可以简单地理解为弦长在作伸缩振动，这种振动方式的能量比横振动要小很多，但对弦振发声也会产生一定影响；扭转振动，可简单理解为弦以自身为轴心作左右摇摆的振动，这种振动在擦弦乐器中表现得比较明显，而在击弦乐器和拨弦乐器上，则相对不明显。

下面详细介绍各种振动与频率变化的关系。

（一）横振动

弦的横振动的基频计算公式为：

（基频）$f_0 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$

公式中，L 是弦长，T 是弦的张力，ρ 是弦的线密度（弦的粗细）。该公式假定弦无限长、无限细，在横振动中 T、ρ 和 L 不变，因此可以断定，上述公式只有在很小振幅振动时才成立。

由上公式可知：假设弦的长度（L）越短，张力（T）越大，弦线密度（ρ）越低，则基频越高，通俗讲就是音越高。这个公式对羊肠弦、金属弦和尼龙弦都适用。当然，不同材料的弦，张力（T）和线密度（ρ）是不同的，所以不同材料的弦，即使长度和粗细都一样，其发音高度也不会相同。

在实际应用上，所有弦乐器都是通过改变弦的长短、张力和弦线密度来控制音高变化的，但不同乐器改变的方式略有差异，例如小提琴主要通过指位和把位的变化来改变弦长，进而改变音高，而古筝则主要是通过弦的张力变化来进行转调。

（二）纵振动

弦的纵振动的基频计算公式为：

（基频）$f_0 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{Y}{\rho}}$

公式中，L 是弦长，Y 是制作弦的材料的杨氏模量（弹性模量，常量），ρ 是材料密度。

由上述公式可知：假设弦越短、越硬，即 Y 值越大，弦越细则弦纵振动的基频越高。注意，纵振动公式与横振动公式的不同之处，就是将横振动中的张力（T）换成了弹性模量（Y）。

纵振动产生的能量相对于横振动来说，虽然能量很小、对音高的影响极不明显，但这种振动产生的高频声会影响弦的音色。不同材料的弦，弹性模量（Y）和材料密度（ρ）不同，因此纵振动的频率成份也不同，音色自然也就有所差异，羊肠弦、金属弦和尼龙弦之间音色有别，道理就在于此。

(三)扭转振动

琴弦受到拉弓摩擦或手指弹拨时会产生扭转,于是产生扭转振动,扭转振动的基频为:

(基频) $f_0=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{G}{\rho}}$

公式中,G 是弦材料的刚性系数(注意不是弹性系数)。这个公式与前两个公式相比可看出,扭转振动的基频(f_0)与张力(T)和杨式弹性模量(Y)无关。

扭转振动与纵振动一样,能量也很微弱,对弦振发声的音高基本不产生影响,但会影响音色。了解弦乐器的人或许都有这样的体会:所有的弦乐器中,擦弦乐器的音色变化一般要比击弦乐器更丰富,原因之一,就是擦弦乐器的弦振发声中含有一定的扭转振动成份,而击弦乐器的弦振发声中几乎没有扭转振动的频率成份。

由于以上三种振动方式往往是同时产生,很难分离,这给弦乐器的音色研究带来一定困难。我们往往无法确定,影响某一种乐器音色的因素到底来自哪一种振动。从另外一个角度看,这种困难或许也正是乐器声学研究的独特魅力所在。

二、弦振动与音乐的关系

我们在第七章第二节中已经谈过,一根弦在振动时,除了全弦振动外,同时还伴随有分段振动。图11-2显示了弦分段振动产生节点的情形。

(a)　　(b)

(a)弦振动节点线图　　(b)弦振动节点X光图

图 11-2　弦振动产生节点示意图

这些分段振动的频率与整体弦振动(横振动)频率构成整数比,即1:2:3:4……的关系,这一点与空气柱振动有相同之处。因而,所有的弦振发声都具有明显的乐音性质,即音高明确,乐音高度基本由基频来确定。

根据杨氏定律(Young's law),如果在弹性物体的某个位置上激发它振动,这个激发位置就会成为振波的波腹而不是波节;如果在某一位置截止它的振动,这个位置就称为振波的波节而不是波腹。弦属于弹性物体,根据这个定理,在不同位置激发弦的振动,会改变振波的波腹和波节的分布,从而影响到弦振动的音量和音色。因此对所有弦乐器来说,在弦的哪一个部分对其进行激发是非常有讲究的。我们已经知道,在弦振动的谐音列中,随着谐音序号的增加,会产生一些不协和的泛音,如第10号泛音与基音就构成一个复增四度的音程关系。(谱

例11-1)这个泛音是弦被分成11段振动时产生的,如果我们在演奏时选择有效弦长的1/11处作为激发位置,就可以使这个位置成为弦振动的波腹,从而抑制第10号泛音的振幅,削弱声音中的不协和成份,使音色更纯净。

谱例11-1 弦的谐音列

弦的张力、弹性模量、刚性和材料密度不仅对发音高度有直接影响,同时对弦的谐音列成份也起一定作用。要想使琴弦发出某一规定的音高,可以有多种方法:或者调整弦长,或者改变张力,当然也可以调整弦线密度。理论上讲,无论采用哪一种方法,都可以达到预想的音高,但在音色上却有较大差异。以小提琴为例,我们想演奏小字一组的 a^1 音时,至少可以用三种指法,一是在A弦上演奏空弦,二是在D弦的第三把位上用二指演奏,三是在G弦的第五把位上用四指演奏(见图11-3)。

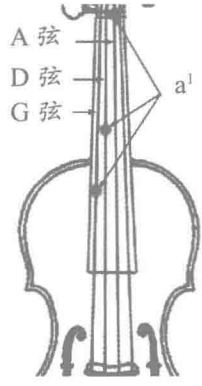


图 11-3 在不同把位演奏 a^1 音示意图

了解小提琴的人都知道,这三种指法演奏的 a^1,虽然音高一样,但音色却截然不同:在A弦用空弦演奏的 a^1,音色比较明亮、松弛,这是因为此时A弦的长度、径度和张力三者都处于比较适中的状态;在D弦演奏 a^1,音色稍暗、略带紧张度,这是因为此时运用的指法使D弦弦长变短,径度和张力都有所增大;在G弦演奏 a^1,音色更暗,紧张度和力度更为明显,因为此时弦长更短,弦的径度和张力都已达到较高水平。对小提琴非常了解的作曲家,经常在作品中特意标出指定的指法,就是为了获得某种特定的音色效果。

乐器上使用的弦,大多是以丝、肠衣、尼龙、金属等材料制成,但有些传统的民间乐器还使用其它材料制弦,例如我国维吾尔族常用的传统艾捷克,就将数根马尾绞在一起作为琴弦。

通常情况下，羊肠弦发声较纤细而柔和，金属弦发音比较明亮，丝弦和尼龙弦亮度居中。为了使弦获得均匀的张力，同时缩小弦的直径，保证弦的柔韧性，一般情况下，中音和低音弦都采用缠弦的方法制成，即在一根弦线外面再缠上一层或数层的细丝线。理想的琴弦应当既有一定刚性，以保证琴弦具有较强的张力，同时还要具有一定的柔韧性和均匀度，以保证音色的柔美和统一。此外，考虑到演奏者手指和视觉的舒适性，弓弦乐器琴弦的表面还必须做到细致、光滑，色泽明亮，且没有氧化物带来的污染。

第三节　擦弦乐器

以弓和弦的摩擦作为弦振动激励源的乐器，称为“擦弦乐器”，或“弓弦乐器”。虽然各种擦弦乐器在形制上有很大差异，但在声学系统结构上大同小异。

以小提琴为例（参见图11-1）可以得知，所有擦弦乐器大致可分为激励系统（琴弓）、弦振系统（系弦装置）、传导系统（琴马）、共鸣系统（琴箱）和调控系统（调弦、控音装置）五个部分。

擦弦用的弓毛一般用马尾制成，在放大镜下观察表面呈现鳞片状。为使弓毛具有更强的粘滞力，在弓毛上要擦上松香。运弓时，弓摩擦琴弦，以一定的压力和速度运动，这时弓和弦之间的摩擦力使弦作横向位移，至一定幅度时，弦的弹性恢复力大于弓与弦之间的粘滞力，于是弦就以很快的速度向平衡位置反弹回来，并越过其平衡位置，在琴弓摩擦力的作用下，继续向相反的方向位移。达到一定幅度后，弦的弹性恢复力再次大于弓与弦之间的粘滞力，琴弦又快速向平衡位置反弹，如此便产生了周期性的弦振动（参见图11-4）。

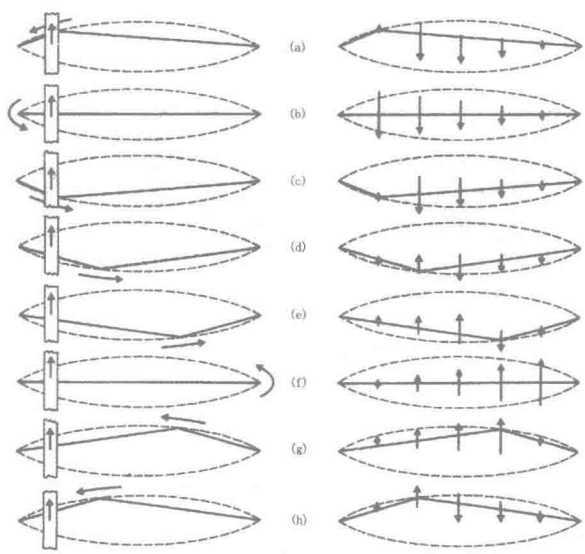


图 11-4　小提琴琴弓摩擦琴弦振动示意图

说明:(a)~(b)琴弦移位至一定幅度时,弦的弹性恢复力大于弓与弦之间的粘滞力,琴弦快速向平衡位置反弹;

(c)~(d)反弹的琴弦越过平衡位置后,在琴弓摩擦力的作用下,继续向相反的方向位移;

(e)~(f)琴弦位移达到一定幅度后,弦的弹性恢复力再次大于弓与弦之间的粘滞力,琴弦又快速向平衡位置反弹;

(g)~(h)弓与弦的摩擦再次使弦产生新的移位,如此便产生了周期性的弦振动。

擦弦乐器的发声强度与弓压以及与弦接触的位置有很大关系。仍以提琴为例,通常情况下弓压越强,音量越大,但是若压力过强,使得琴弦反弹恢复力受到抑制时,声音不仅得不到加强,音色也会失真。论及提琴琴弓与琴弦接触的位置,不仅影响发声强度,也会影响提琴的音色。科学家舍伦(Schelleng)专门研究了大提琴琴弓压力和触弦位置对音量和音色的影响,结果如图11-5所示[1]:

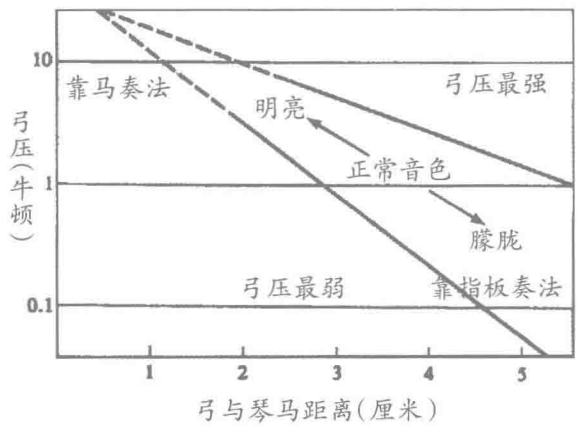


图 11-5 大提琴弓压和触弦位置与音色关系示意图

从图中可以看出:

1. 大提琴弓压最强可达10牛顿,最弱为0.1牛顿。

2. 琴弓在距离琴马2~5厘米左右处触弦,并且施加最大压力可以获得明亮的音色效果。

3. 琴弓如果在上述位置触弦,弓压适中(1牛顿左右),则可以发出正常的音色。

4. 琴弓如果靠近指板(距离琴马4~5厘米),且弓压小于1牛顿,则发出朦胧的音色效果。

当琴弓在有效弦长的1/11处(指板下沿与琴马的中间)触弦时,还可抑制与基音不协和的第10号泛音(即第11号谐音)的发声,因而可以获得最纯正的弦乐音色。但上述距离都是基于空弦而言,在演奏高把位的乐音时,擦弦位置应随着有效弦长的缩短而往琴马方向靠拢。

[1] Thomas D.Rossing. *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982:173.

此外，采用靠指板奏法（Sul tasto），会抑制第1、3、4号泛音的振幅，使音色变得柔和，给人一种朦胧的感觉，作曲家德彪西（C.Debussy，1862~1918）在其歌剧《佩利亚斯与梅丽桑德》中曾采用过这种奏法。

采用靠马奏法（Sul Ponticello）会抑制基频振幅，突出第5号泛音，音色显得明亮，略带生涩。德国作曲家瓦格纳（R.Wagner，1813~1883）在其歌剧《特里斯坦与伊索尔德》第二幕中曾采用过这种奏法。

许多擦弦乐器不仅可以用琴弓擦奏，也可以用手指或拨子拨奏。拨弦触弦的位置要与琴弓触弦的位置避开，一般是离琴马更远的位置，一是因为琴弦这个位置弹性较好，利于手指拨奏；二是为了避免手指上的一些汗液和油脂粘到琴弦上，减弱琴弓与琴弦之间的摩擦力。此外，琴弓上一旦粘上油脂，还会影响松香与弓毛的结合。

如同管乐器一样，有些擦弦乐器也使用弱音器，以获得特定的音色效果。在提琴上，最常用的弱音器是像“山”字形的弱音器，使用时夹在琴马上等于增加了琴马的载荷，使其不能充分振动和传导振波，从而达到“弱音”的目的。一般讲，弱音器并不能将所有频段的振波均匀减弱，譬如小提琴，加上弱音器以后减弱了1000~5000赫兹频段的谐波（相当于小字三组的c至小字五组的降e），因为整个频谱发生了变化，因此给音色带来明显的影响。图11-6展示了小提琴的自然声与加上弱音器后声音频谱的比较。

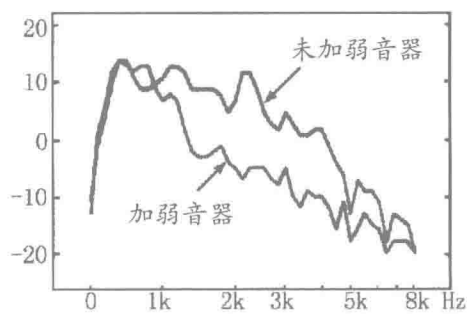


图 11-6　使用弱音器频响效果比较

弱音器的使用方法并不千篇一律，例如，中国民族乐器——高胡，就是用腿夹住琴筒的形式，抑制皮膜振动，从而达到弱音的目的。

擦弦乐器有丰富的弓法，如小提琴就有连弓、分弓、跳弓、断弓、顿弓、震弓等。不同弓法会产生特定的音响效果，从声学本质上讲，是由于琴弓激励琴弦方式的不同所致，具体来说，就是在琴弦振动初始的阶段，各种弓法之间存在一定差别。从频谱角度讲，不同弓法产生的瞬态噪声是不同的，这一点在频谱上显现得很清楚。这里以小提琴用分弓和跳弓演奏E弦空弦的频谱作为例子（见图11-7）：

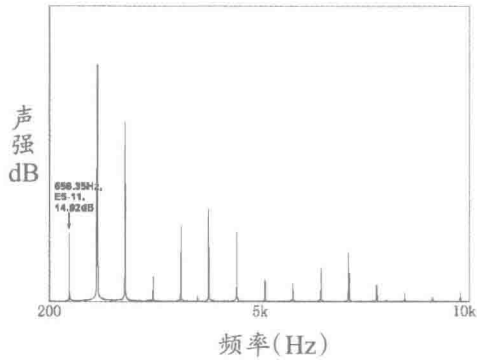


图 11-7 分弓演奏 E 弦的频谱

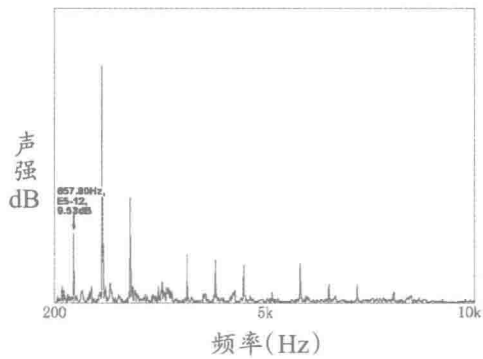


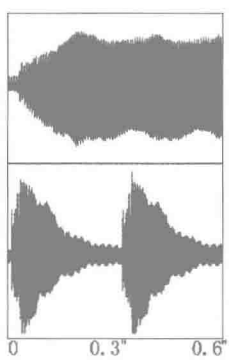
图 11-8 跳弓演奏 E 弦的频谱

从频谱的比较上可以看出二者有如下差异：

1. 分弓中、高频泛音比跳弓更丰富一些，因此音色更柔和、清晰一些。

2. 跳弓频谱中的噪音成份比分弓明显多一些(见二者频谱的底部区域)，因此跳弓的音色听起来更具擦弦性质。

除频谱外，两种弓法的起始包络也有区别(见图11-9)：



(a)小提琴分弓演奏的波形包络

(b)小提琴跳弓演奏的波形包络

图 11-9 小提琴两种方法的波形包络

分弓的起始过程，即振动从零到最大幅度所用的时间约为0.2秒，而跳弓仅约为0.05秒，因此后者听起来更敏捷、跳跃。

第四节　拨弦乐器

以手指或拨子拨弦作为激励声源的乐器，称为“拨弦乐器”。

同擦弦乐器一样，尽管各种拨弦乐器形制各异，但在结构上依然可大致分为激励系统（手指或拨子）、弦振系统（系弦装置）、传导系统（琴马）、共鸣系统（琴箱）和调控系统（调弦、控音装置）五个部分。现以中国民族弹拨乐器——阮为例（见图11-10）：

图 11-10　弹拨乐器声学结构示意图

注：本图缺激励系统——拨子

其发声原理基本与擦弦乐器一样，拨弦乐器以手指（或拨子）将琴弦带离平衡位置，然后突然将弦放回，此时弦的张力和反弹力促使弦以很快速度向平衡位置反跳回来并越过其平衡位置，弦的张力和弹力所产生的惯性使弦继续进行往返运动而产生声振动。振动通过琴马传至共鸣箱，声能由此而得到扩散。调控装置则用来调整每根空弦的音高。

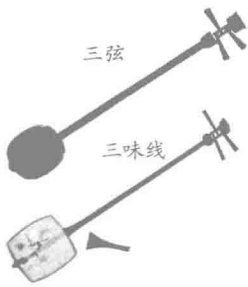
从音乐声学角度讲，演奏拨弦乐器时，音高变化主要由弦的长度决定，音量变化主要由手指或拨子施加给弦的压力和拨弦速度决定，音色变化则主要由手指或拨子触弦位置及弹奏方式决定。对于像筝那种无“品”的拨弦乐器来说，演奏者通过按压琴弦的方法，也可以改变音高，这种用改变琴弦张力的方式产生音高变化的手段是中国民族乐器常用的演奏技巧。

与擦弦乐器不同的地方是，拨弦乐器是一次性激发弦振动，即拨一次弦发一个音，声音不能持续。每个音都有明显的始振过程和衰减过程，没有擦弦乐器的稳态过程。一般情况下，

弦越长衰减过程越长，余音就越长，反之亦然。如果需要发生长时值的声音，就得对弦连续拨弹，称为“轮奏”或“滚奏”。但能否连续拨弹是有条件的，这主要取决于拨弹工具的形式，目前来看，手指和用偏软性材料制成的“指甲”是最理想的拨弹工具，如果材料偏硬，或形制偏大，都不利于“轮奏”技巧的发挥。

用什么工具来激发弦，对拨弦乐器的音色也有很大影响。因为这直接影响到拨奏的力度、速度、触点、演奏姿态。笔者对此专门做过比较研究，研究的对象是中国的小三弦和日本的三味线，在此稍加介绍。

根据学者研究，日本的三味线与中国的三弦有着渊源关系[1]。随着历史和人文环境的变迁，今日三弦与三味线在形制、演奏姿态、和应用功能方面都已发生变化（见图11-11中比较）。单从乐器主体外形上看，二者差异并非十分明显，但仔细观察，可以发现在激弦工具上二者差异较大，三弦用指甲形拨子，三味线则使用斧形拨子，由此产生的音色效果也不尽相同。



(a)三弦与三味线外形比较

(b)三味线演奏姿态

(c)三弦演奏姿态

图 11-11 三弦与三味线的比较

三弦又有大、小之分，因为三味线在形制上与小三弦最为接近，所以这里就以小三弦的声音频谱按高、中、低三个音区与三味线作逐一对照。

1. 低音区。

共性：二者谐音都比较丰富。

差异：三味线第5号谐音强度与小三弦的第4号谐音大致相当，因此在音色上比小三弦更具明亮、坚实的特征。

[1] 王耀华：《三弦艺术论》（中卷），海峡文艺出版社 1991 年版，第 88 页。

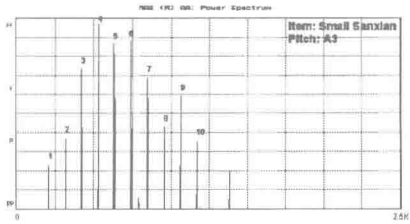


图 11-12　小三弦低音区频谱

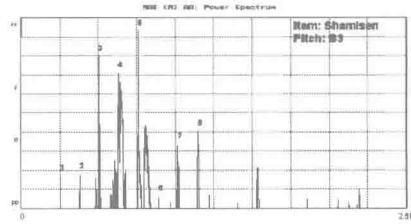


图 11-13　三味线低音区频谱

2. 中音区。

共性：二者的谐音列总体上都呈波峰状，体现出三弦类乐器特有的频谱形态。

差异：小三弦谐音数量略多于三味线，体现在音色方面，小三弦的中音区在听感上比三味线稍为圆润一些。

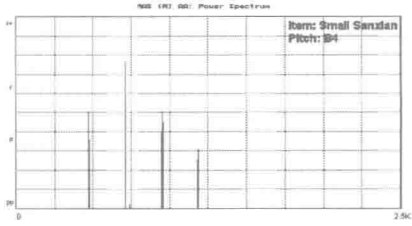


图 11-14　小三弦中音区频谱

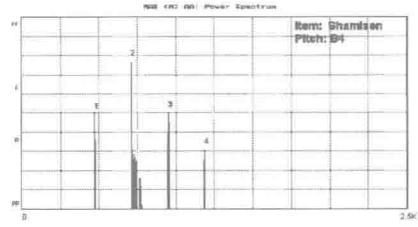


图 11-15　三味线中音区频谱

3. 高音区。

共性：第1号谐音（基音）的强度都比较高。

差异：小三弦的谐音数量多于三味线，在高音区声音更为圆润。

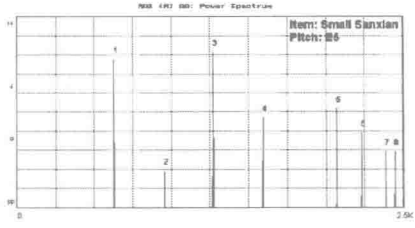


图 11-16　小三弦高音区频谱

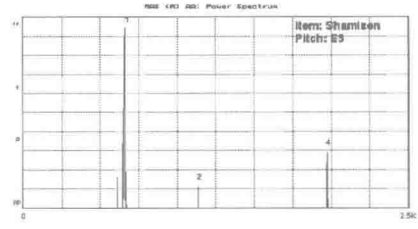
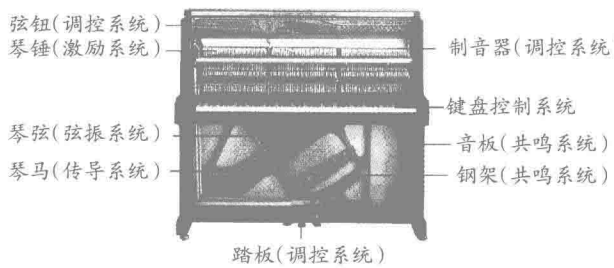


图 11-17　三味线高音区频谱

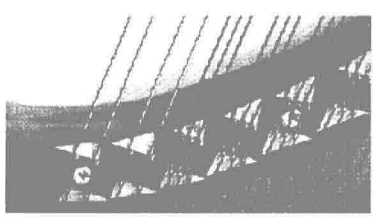
综上可知，尽管三味线在形制上与小三弦最为接近，但由于激发工具和演奏方式上的差异，导致二者的音色在低、中、高三个音区都有差异。

第五节 击弦乐器

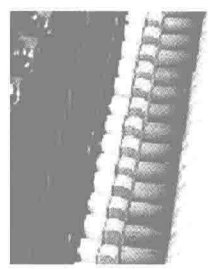
以敲击琴弦作为激励声源的乐器，称为“击弦乐器”。根据结构上的不同，击弦乐器又可分为两大类，一类与前两种弦乐器一样，也是由激励、弦振、传导、共鸣和调控5个系统组成，如扬琴；另一类则在第一类的基础上又多了一套键盘控制系统，如钢琴。二者发声原理完全相同：由击锤敲击琴弦，使琴弦产生振动，通过琴马传至共鸣体，声能由此而得到扩散。下面以立式钢琴的结构为例：



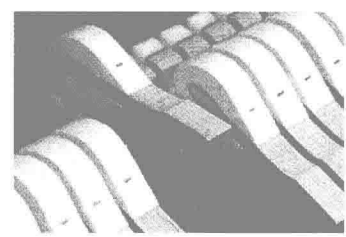
(a)立式钢琴声学系统示意图



(b)钢琴琴马部位局部图



(c)制音器局部图



(d)钢琴琴槌击弦局部图

图 11-18 立式钢琴结构图

从音乐声学角度讲，演奏击弦乐器时，音高变化主要由弦的长度决定，音量变化主要由击锤敲击弦的力度和速度决定，对于有键盘系统的击弦乐器来说，由于其击弦位置相对固定，如钢琴一般在有效弦长的1/7~1/9处，音色变化则主要由触键的力度和速度决定；对于无键盘系统的击弦乐器(如扬琴)来说，因为其击弦位置不固定，还可以通过改变击弦的位置来改变音色。

对于击弦乐器来说，作为激励琴弦的撞击物，其形状、质量、材料弹性和刚度对音色和音量有直接影响。就形状而言，最重要的是触弦面积的大小。触弦面积与弦长成正比关系，弦越长触弦面积应当越大。对琴弦数量不是太多的击弦乐器来说，如果琴弦长度和径度差异

不是很大，琴槌形状无需变化。钢琴由于琴弦数量较多，最高音和最低音之间的弦长和弦径差距较大，因此琴槌在形状上必须加以改变。图11-19是普通立式钢琴中最大和最小琴槌的比较[1]。

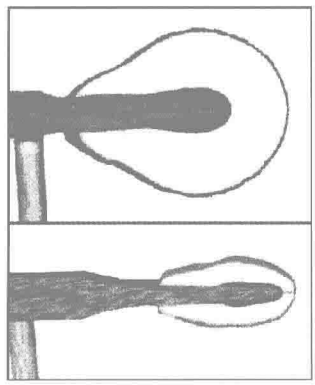


图 11-19　(a)低音琴槌外形　　(b)高音琴槌外形

此外，如果用较硬的琴槌击弦，槌与弦的接触时间较短，始振过程也较短，高频泛音的振幅很强，音色脆而带金属声；如果以软槌击弦，槌与弦的接触时间较长，始振过程会稍长，基频振幅较大，音色会更圆润，但音色会稍暗。

钢琴低音区的声音不像中、高音区那么清晰、明确。对此有的理论认为：由于低音弦的弦径较粗、张力较大、刚性较强，因而已经不能视其为“弦”而应视其为“棒”，应按棒振动频率公式来分析其发声特征[2]。

一些优秀钢琴家在演奏时，仿佛全身都在随着旋律的流动而摆动，其触键后的一些动作和音色会使人想象其手指上可能有某种“特殊的技巧”。其实，由于钢琴结构的原因，钢琴家只能通过改变琴槌击弦的力度来控制音色，而力度又主要取决于触键速度，速度越快，力度越强。优秀钢琴家可以通过各种触键技巧调节触键速度，从而达到随心所欲地控制力度变化的境地。

一般情况下，钢琴在键盘上是无法奏出自然泛音、滑音和波动音，但一些有想象力的作曲家和钢琴演奏者，不愿受钢琴击键结构的束缚而是直接用手指或拨子去拨琴弦，也可以奏出自然泛音、滑音和波动音的效果。

我国民乐队常用的击弦乐器是扬琴。扬琴的击槌称为“琴竹”，在使用时有较多的选择余地。如果需要奏出柔和圆润的音色，可以将琴竹裹上较厚的胶布或毡呢，由此可以减少带有

[1]　取自北京钢琴厂生产的 KAWAI KC-121C 型钢琴。

[2]　Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addison-Wesly, 1982: 264.

刚性的琴竹与琴弦撞击的一刹那产生的高频泛音和噪音；如果想获得尖锐而带金属声的音响，可以将琴竹翻转，直接用竹背击弦。

扬琴的演奏，在一手操琴竹、一手按弦时，可演奏泛音、滑音和波动音。泛音的发音原理同其它弦乐器，手指轻触琴弦某一点，击弦时就可获得自然泛音，但无法奏出人工泛音。滑音的奏法有两种，一种是以一指按在琴马外的弦上，通过手指按弦力度的变化，改变弦的张力，从而获得滑音效果，因弦的张力所限滑音一般不超过大二度音程；另外一种滑音奏法是用专门指套套在非持琴竹的手指上，用改变扬琴有效弦长的方式取得滑音效果。波动音演奏原理与上述第一种滑音一样，只是手指按弦时作周期性的压力变化。近年来对扬琴的改良层出不穷，在音域的宽度、转调能力和音长控制等方面已达到比较完善的程度。

章后思考与讨论题

1. 弦乐器的共鸣系统对乐器的音色和音强起到何种作用？其声学原理是什么？

2. 影响弦振动音高的因素有哪些？弦的横振动的基频计算公式如何表达？

3. 为何同样的弦乐器使用不同材质的琴弦会导致音色变化？其声学原理是什么？

4. 请解释弦乐器通常使用的弱音器的工作原理。

5. 钢琴为何使用大小不一的琴槌？如果使用大小统一的琴槌会产生什么问题？请从音乐声学的角度加以解释。

6. 弦乐器演奏中的“狼音”属于音乐声学问题吗？如果是，如何才能解决？

7. 从乐器声学构成角度思考如何解决弦乐器“音量小”的问题。

第十二章　打击乐器声学特征

第一节　打击乐器发音原理概述

“打击乐器”(Percussion Instruments)或许可以说是所有乐器中最为复杂多样的一个家族，它们不仅在样式上形态各异，在声学结构上有多种类型，就是在演奏方式上也千姿百态：有击奏发声的，如鼓、锣、钟等；有摇奏发声的，如哗啷器(摇响器)、沙锤等；有刮奏发声的，如刮响器、中国古代乐器敔等；有拨奏发声的，如遍布世界各种类型的口弦；当然还有以复合演奏方式发声的，如铃鼓，既可击奏，同时又可摇奏(见图12-1，图12-2)。

按萨克斯－霍恩博斯特尔分类法，打击乐器应当归为“膜鸣乐器”和“体鸣乐器”。构成膜鸣乐器的主体主要是鼓类乐器，而体鸣乐器包含的种类却要复杂得多，从声学角度至少又可分为“棒振动”和“板振动”两大类。

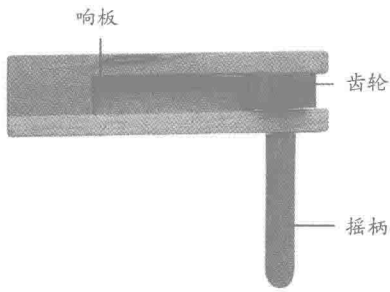


图 12-1　哗啷器(摇奏乐器)

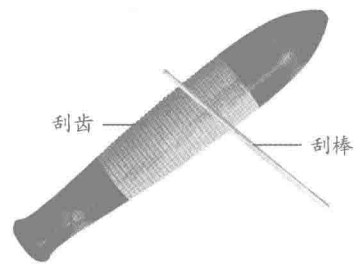


图 12-2　刮响器(刮奏乐器)

萨克斯认为打击乐器应当是人类最早出现的乐器种类，然后才是吹奏乐器和弦乐器[1]。据我国考古记录，目前所能见到的最早的打击乐器，是在黄河流域的马家窑、仰韶、大汶口和龙山等文化遗存中出现的用陶土烧制的铃[2]，这些乐器距今不过6000年左右，而在河南舞阳地区贾湖村发现的骨笛，却已有8000年以上的历史。

从总体结构上分，所有打击乐器可分为两大类：有共鸣系统和无共鸣系统。有共鸣系统

[1]　缪天瑞主编：《音乐百科词典》，人民音乐出版社 1998 年版，《乐器学》词条。

[2]　李纯一：《中国上古出土乐器综论》，文物出版社 1996 年版，第 85 页。

的打击乐器，常见的如各种带腔的鼓、加装共鸣管的木琴、铝板钟琴、口弦等。对这些乐器来说，共鸣系统一方面具有扩大声辐射面积的作用，同时还具有频率耦合作用，即可以通过共鸣腔体体积来调节振动源本身的频率（音高）和音色。无共鸣系统的打击乐器，常见的如三角铁、锣、编钟、编磬等。这些乐器一般只有激励系统和振源系统，少量的乐器带有调控系统，主要用来控制音的长短，典型的如架子鼓中的踩镲。

定音鼓属于比较典型的有共鸣系统且音高可调的打击乐器，其结构较为复杂，在此用于说明打击乐器的总体声学结构（见图12-3）：

图 12-3　定音鼓声学结构示意图

踩镲属于无共鸣系统类打击乐器，其声学结构由激励系统、振动系统和调控系统组成（见图12-4）。

图 12-4　踩镲声学结构示意图

下面内容将打击乐器按膜体、棒体和板体三大类来分别介绍。

第二节 膜体打击乐器

膜的振动与前面介绍过的空气柱和弦振动相比，既有相同之处也有不同之处。相同之处在于，膜振动也是复合振动，即在整体振动的同时还存在分区振动。由整体振动产生的音称为基音，分区振动产生的音称为泛音或分音。不同之处在于，膜振动产生的泛音频率与基音不能构成整数比关系，因而未加调整的膜振动不能发出具有清晰音高的声音。

膜的分区振动也是呈一定规律的，以圆形膜为例，分区振动皆是以径向节线和轴向节线的分隔而产生（参见图12-5）：

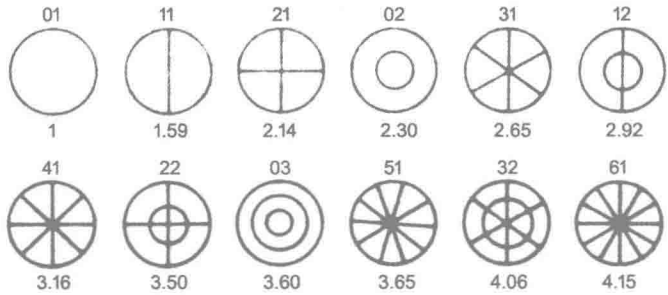


图 12-5 圆形膜振动节线示意图

每个圆形上方的两位数的数字代表该振动模式产生节线的数量，第1位数字代表径向节线的数量，第2位代表轴向节线的数量。例如，“01”表示没有径向节线，只有1个轴向节线（在最外侧）；“11”表示有1个径向节线和1个轴向节线，此时膜被分隔成2个分区，可称为“径向2分区”；“21”表示有2个径向节线和1个轴向节线，此时膜被分隔成4个分区，可称为“径向4分区”；而“02”则表示只有2个轴向节线，没有径向节线，因此可称为“轴向2分区”，以此类推。

每个圆形下方的数字代表该振动与整体振动的频率比值。例如，假如以整体振动的频率作为1的话，径向2分区膜振动的频率比值就是1.59，径向4分区膜振动的频率比值就是2.14，而轴向2分区的频率比值为2.30等。

图12-5图形中出现的频率比值都是据理想圆形膜的频率公式推导而出：

$$f_{mn}=\frac{1}{2a}\sqrt{\frac{T}{\sigma}}\beta\ mn$$

公式中，m 是径向节线数量，n 是轴向节线数量，a 是膜半径，T 是膜张力，σ 是膜密度，β 是贝塞尔函数值。

由前面公式可以看出：**膜的振动频率与张力成正比，与半径和膜密度成反比。**

因此，对于鼓来说，鼓面直径越大，张力越小，声音越低。所谓“理想膜”是指厚度和弹性完全一致的膜。实际上，所有用于制造乐器的皮膜都不可能是“理想膜”，所以上面的公式仅具有一定参照价值。

从以上这些频率值可以看出，膜振动产生的泛音与基音皆不构成整数倍关系，因此从理论上讲，膜振动不可能发出音高明确的乐音。读者或许要问，为什么管弦乐队中的定音鼓可以有明确的音高？首先，定音鼓的膜是经过特殊处理的，其厚度、弹性和张力已偏离“理想膜”的范畴，从而能够抑制一些不协和泛音的能量。其次，定音鼓的锅形共鸣腔对鼓膜的振动频率起到了“耦合”作用，能够将一些不协和的泛音加以调整，使之与基音构成协和或近似协和的关系。

图12-6是一个定音鼓发声的频谱，从图中显示的泛音情况可以看出，基音是大字组的升C，第1个泛音是偏高一点的升G（高出标准音16音分），第2个泛音是小字组的升c（高出标准音9音分）。由此来看，这三个音基本构成一个五度加八度的协和关系，因此这个鼓声听起来具有明确的音高感。

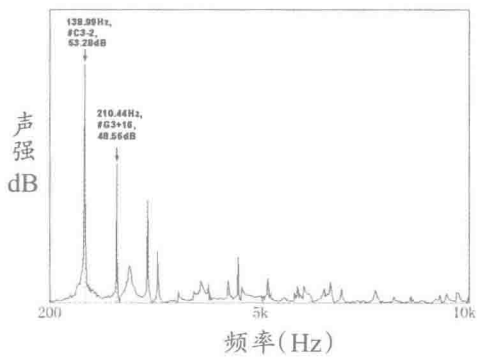


图 12-6　定音鼓频谱

中国大鼓的鼓腔一般为桶形，鼓膜张力不可调，因此其发声特点与定音鼓有所差异。图12-7是一个敲击中国大鼓发声的频谱，从图中显示的泛音情况可以看出，基音是偏低的大字1组的D（-34音分），而第1个泛音是偏高的升F（+45音分），与基音构成一个近乎增三度的不协和关系，第2个泛音又是一个偏高的大字组的D（+38音分），与基音构成一个几乎增八度的音程关系。由于这三个音构成一个不协和的音程关系，因此鼓声听起来不具有明确的音高感。

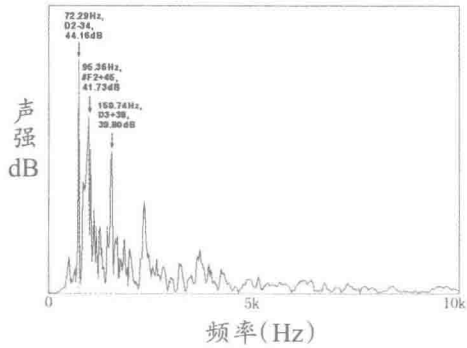


图 12-7 中国大鼓发声频谱

根据圆形膜振动分区的道理,其激发位置可划分为中心,内圈、中圈和外边几个部位。一般而言,鼓的最佳激发位置在内圈与中圈之间,也就是鼓面直径2/6~2/8处,在此处敲击有助于激发基频的振幅,并可抑制一部分不协和的泛音成份。但是在强奏时,随着力度的加强,激发位置一般需要逐渐向中心移动,使膜面可以承受强大的冲击力。

膜体打击乐器的音量取决于外力激励膜面的强度以及激励的位置,只有适度激励膜面,使膜的弹性模量处于最佳状态时,才能使膜振动达到最大振幅。膜体打击乐器的音色变化,主要与激发工具的软硬度有关,较硬的激发工具能产生较明亮的音色,较软的激发工具则产生较柔和的音色。此外,有些膜体打击乐器还可通过增加附加共鸣装置来改变音色,例如在小军鼓鼓面上加一组钢丝弦,击奏时弦与膜产生碰撞,可以产生特殊的高频振动效果;铃鼓的鼓帮上加上小铃,击奏时膜与铃同时发声;有时人们还在鼓面上蒙上一层棉织物,从而发出一种朦胧的音色,如同加了弱音器。

第三节 棒体打击乐器

乐器中所指的棒,是泛指所有类似棒状的弹性物体,包括矩形棒(如木琴的音板)[1]、直形棒(如响棒)、圆形棒(如双音木鱼)和曲形棒(如三角铁)。

[1] 木琴的音板从俯视角度看是矩形,但从正侧视角度看,其中部被挖去一部分,其目的有两个:一是减少刚性,容易产生较低的音;二是用来调整泛音与基音的关系。

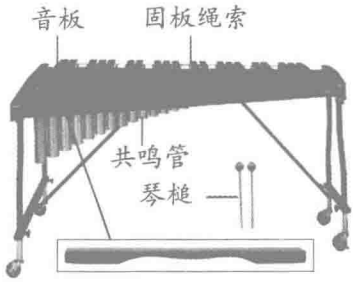


图 12-8　木琴(矩形棒)

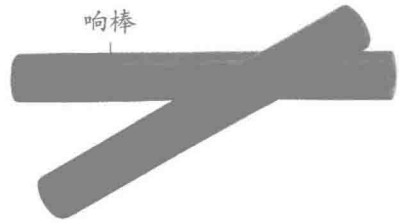


图 12-9　响棒(直形棒)

图 12-10　双音木鱼(圆形棒)

图 12-11　三角铁(曲形棒)

棒体受到外力激发后,会产生偏离平衡位置的变形,并随之作惯性振动,发出声响。大多数棒振动乐器都是以横向敲击的方式发声,只有极少数乐器是以敲击棒的端部发声,因此可以认为,棒体打击乐器主要以横向振动为主,以纵向振动和扭曲振动为辅。在横向振动中,棒体可能存在三种情况:一端自由,一端被固定;两端皆被固定;两端皆自由。大多数棒体打击乐器属于两端皆自由的情况。下面给出的是两端皆自由的棒的横向振动频率变化公式[1]:

$$f_n=\frac{\pi vK}{8L^2}m^2$$

公式中,K 是棒的回转直径(对矩形棒而言,$K=t/\sqrt{12}=3.46t$ (t 是棒的厚度),对管而言,$K=1/2\sqrt{a^2+b^2}$ (a 是内径 b 是外径)) v 是声速 $=\sqrt{Y/\rho}$ (Y 是杨式弹性模量 p 是密度),L 是棒长,m=3.00112, 5, 7,… ($2n$+1)

棒的纵向振动频率变化公式是从弦振动公式引申而来:

$$f_n=n\frac{v}{2L}(n=1,2,3,\cdots\cdots)$$

综上可知:**棒的横向振动频率变化,如果是矩形体,则决定于不同的厚度、长度、宽度和材料的密度;如果是圆柱体,则决定于不同的长度、截面半径和材料的密度。**

只要改变上述各因素之一项,就能改变振动的频率。对于矩形体来说,越长、越宽、越厚

[1]　Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addision, Wesly, 1982: 235.

的材料，其劲度、密度越低，则频率就越低，反之则频率越高。

棒振动时与其它类型振动一样，也是既有整体振动也有分段振动（见图12-12）。

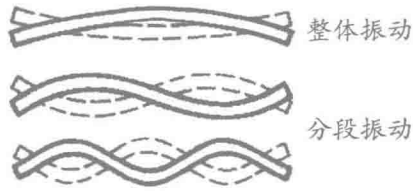


图 12-12　棒体分段振动示意图

没有经过加工的棒在自然状态下，分段振动产生的泛音与基音皆构成不协和关系，但经过适当磨削加工的棒，可以去掉或调整一些不协和的泛音，使之更具乐音特性。例如，木琴、马林巴和铝板钟琴的音板经过磨削加工后，都可以产生比较协和的泛音。从下面图12-13木琴的频谱中可以看出，这块音板的基音为小字2组的 c，4个泛音分别为 g^3、$^{b}a^4$、$\uparrow{}^{b}e^5$、a^5，除第3泛音外与基音基本构成协和关系，因此木琴可以作为定音乐器来使用。

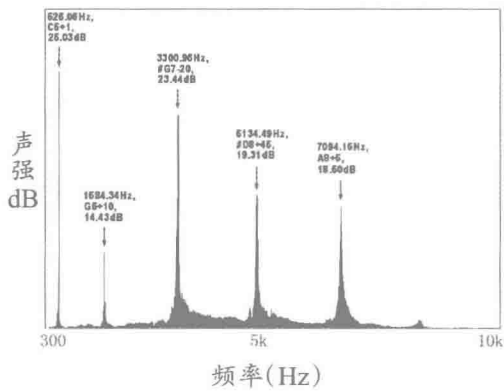


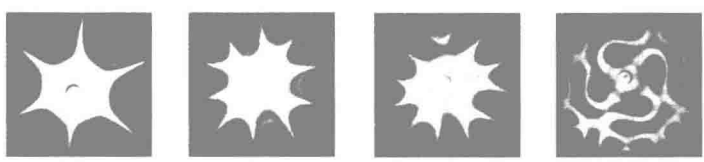
图 12-13　木琴发音频谱

作为乐器，棒体发声的音量变化取决于激发力的大小，但二者并非成严格的正相关线性关系。有时，当对棒所施加的力过大时，能量使棒产生扭转，而不能与振幅成正比。这一点，打击乐的乐手有切身的体会，例如对三角铁的敲击，如果用力过度反而减弱了音量。按内行的讲法，只有把力敲在“点”上，才能获得最大音量。这个“点”既包含敲击的位置，还包括敲击的手法，也就是能把敲击力尽可能转变为棒体的有效振动。

第四节　板体打击乐器

在乐器声学理论中，把用弹性材料制成的，等边形或圆形的片状体，称为板。板在受到外力后，会产生变形偏离平衡位置，而板的弹性恢复力的作用又使之返回并越过平衡位置，随之作惯性振动，如果没有外界干涉，板体材料本身存在的阻尼会使板振动逐渐减弱直至消失。

板振动时，除全片振动外，亦存在分片振动。在振动模式分析上，人们常常将板视为增厚的“膜”，因此板的频率计算公式基本套用膜的公式，同时也可以用径向和轴向节线理论来解释板的分区振动问题。由于板属于“厚膜”，所以比膜振动还要复杂一些，尤其是当板的厚薄、密度、劲度不均匀时，其波形呈复杂图形。图12-14展示的四幅照片是用激光全息摄影方法拍摄的一面直径为38厘米的钹敲击后的节线效果图[1]。明亮区域表示节线所在。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 12-14　钹振动激光全息摄影图

说明：(a)有 3 条径向节线，没有轴向节线；(b)有 5 条径向节线，没有轴向节线；(c)有 6 条径向节线，没有轴向节线；(d)是两种节线模式的结合：第一种有 13 条径向节线，第二种有 2 条径向节线和 2 条轴向节线。

均匀板的频率变化，与板的厚度、半径和材料密度有关。板越薄、半径越大，密度越小，则频率越低，反之则频率越高。

对于边缘被钳定的圆形板，其频率计算公式为：

$$f = \frac{0.28tv}{D^2}$$

对于边缘为自由端的圆形板，其频率计算公式为：

$$f = \frac{1.65tv}{D^2}$$

上述公式中，D 是圆板直径，t 是厚度，v 是声速。

读者不应忽略上面公式中“声速”一项因素的作用，虽然一般情况下我们都以空气中的声速作为计算标准，但如果板体打击乐器在其它介质中演奏时，由于声速会发生变化，打击乐

[1]　Thomas D. Rossing. *The Science of Sound*, Addision, Wesly, 1982: 252.

器的振动频率(音高)也就随之变化。我们在第六章中已经谈过由于不同介质的声速有差异，会引起声音折射的问题，并引用作曲家谭盾的作品——《永恒的水》协奏曲作为例子，即打击乐手在敲击锣的过程中将锣不断放置水中，结果铜锣的音高和音色都发生了变化。

同膜振动情况一样，上述公式都是基于材料性质和厚度完全一致的“理想板”，而制造乐器所用的板却是形状各异、厚薄不均，材料也多种多样。所以对于乐器制造领域而言，上述公式仅具参考价值，无法严格照搬。

人们在长期音乐实践中发现，用厚度均匀、形状规范划一的板制作的乐器，往往不能发出有明确高度的乐音，音色也不优美。因此，绝大多数板体打击乐器的外形都不规范，厚度也不均匀。如锣、钹等响铜乐器，虽为圆形，但都制成中间隆起的形状，而且厚度不均匀。中国古代乐器编磬也是不规则的矩形，厚度因调音锉磨而呈不均匀状见图12-15。

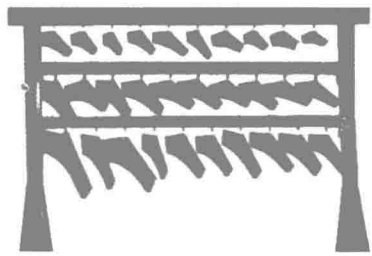


图 12-15　中国古代板体打击乐器——编磬

一般而言，直径较大的圆形板体打击乐器，譬如大锣，因为振动模式太复杂，都不能产生明确的音高。图12-16是管弦乐队中使用的中国大锣的频谱。图中显示：这个大锣的基音频率为79.4赫兹(相当于#D_1+28音分)，泛音成份比较密集复杂，有些泛音的能量超过基音。人耳对这种基音与泛音的结构只能产生一种模糊的音区感觉，根本无法判别准确的音高。

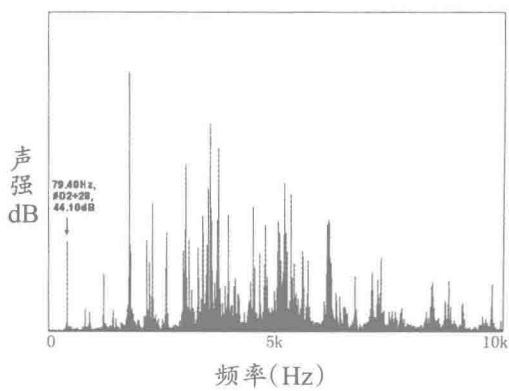


图 12-16　管弦乐队大锣频谱

直径短小的圆形板体振动模式相对简单，乐器制造者可以通过改变板体不同位置的厚度来改变或调整泛音的高度，使之产生明确的音高感。譬如中国民族打击乐器“云锣”，就属于有音高的板体打击乐器。

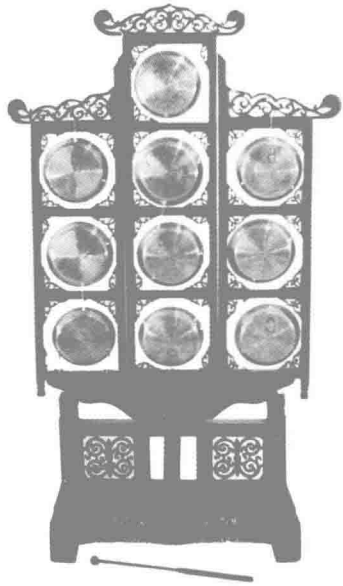


图 12-17　定音板体打击乐器——云锣

我国京剧打击乐中的手锣，不仅有明确音高，通过特殊的敲击手法还可以发出一种由低到高的滑音效果。通过频谱分析可以发现，其音高变化是从 $^{\#}d^{2}$ 至 $^{\#}f^{2}$，为一个小三度（参见图 12-19频谱）。

图 12-18　手锣敲击方式

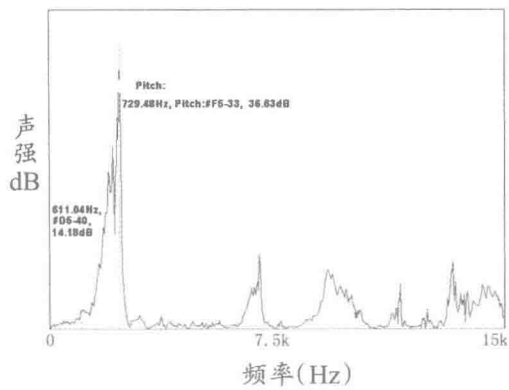


图 12-19　手锣频谱

一个锣的平面，大致可以划分为中心、内圈、中圈和外边四个部分。击奏不同的部分，会获得不同的音色。击中心，始振过程较长，衰减过程也较长，基础音及高次泛音的振幅均较大，发音深沉。如果在这个位置击奏后，立即用手按住锣心，则获得一种振动未能充分展开的闷音，称为闷击。击内圈，突出了低次泛音，基频和高次泛音的振幅被抑制，音色不明朗，衰减过程缩短。击中圈，音色和击内圈相当，但高次泛音更强烈、粗犷。击外边，锣未能充分振动，音色沙哑，有强烈金属声。

上述激发位置的音色特点，适用于所有同类型的锣属乐器，但却不适于用槌击的吊钹。因为钹的中心有穿孔，被绳带穿过吊起，此处成为振动的节。其发声特点与锣相反，越靠近中心声音越高，而击外边和击外圈音质最好。

诞生在南美洲特立尼达和多巴哥的钢鼓，也属于板体打击乐器。当年，特立尼达和多巴哥人民为庆祝第二次世界大战结束，在敲响汽油桶进行狂欢时，发现不同硬度和直径的金属桶会发出不同音高的乐音，于是就创造了钢鼓这种乐器。经过改进的钢鼓可以在一个油桶上发出若干个不同频率的乐音，由数十件钢鼓组成的大型乐队构成由低到高各个声部，可以演奏多声部民间乐曲，甚至古典交响乐曲。

板体打击乐器音量变化取决于对板施加的外力的大小，在弹性模量限度的范围内，施加的力越大，振幅就越大。与其它振动形式相比，板振动可以承受的外力要大许多，而且由于振动体直接暴露在大气中，声波辐射无阻拦，故而板体打击乐器的音量总的来讲都比较大。作曲家在配器时一般都会慎重使用。

板的另一种振动方式是以被迫振动的身份出现，起共振作用。例如提琴、琵琶、钢琴等乐器共鸣器的壁板，就是这样的性质。这时板的振动，一方面受弦振动的制约，另一方面又会激发出板材本身的固有频率，反过来对弦振频率起到耦合作用，从而对乐器的音高、音色和音量产生重要影响。以提琴为例，既有面板、背板、侧板各自的固有频率，又有整体琴身以及琴箱内腔的固有频率，使它在弦振动一系列频率中呈现相应的共振峰和谷。

任何一个制琴者都知道，板材本身的质量对乐器的音质可谓至关重要。用处理过的优良板材制作出的琴，板材与各条弦产生的共振峰和谷在频率分布上是比较均匀的，因此听起来高低音区声音比较平衡。用劣质板材制作出的琴，则会出现高低音区不平衡的情况，甚至出现难听的“狼音”。

第五节 类板体打击乐器

有些乐器，譬如钟等，虽然从形状上看根本不是“板”，但从声学原理讲，可以用板振动理论来加以推算，因而可以称它们为“类板体乐器”。西洋的圆钟、手钟、中国古代的镈钟、合瓦

形的甬钟和纽钟，都属于类板体打击乐器。

钟在世界各个民族的起源都很早。非洲铁质铆钟比其铸造铁金属的时期早[1]；公元前600年左右，在亚述有小铃的出现；在秘鲁、爱沙尼亚、缅甸和马来群岛等地都曾发现早期的矩形木钟；公元前后，印度僧侣们就已经使用印度梵钟[2]；但这些地区的钟在当时并未发展成一种乐器。按萨克斯理论，欧洲有两类钟：一种形似蜂房，带有钟舌，小而薄；另一种是郁金香花形。直到9世纪，西方才有少量的圆形钟组成的编钟用来演奏音乐（见图12-20）。

图 12-20　西洋圆钟外形

关于中国钟的起源，史籍记载说法不一，或说炎帝[3]，或说黄帝[4]，或说尧帝[5]时所造。综合考古发掘的大量遗物来看中国钟类乐器发展的脉络，应当先有陶土制造的铃或钟，后发展为青铜制造；先有单个的钟，后发展为编列成组并按一定乐律体系发音的编钟。

迄今考古所发现的较早的铜钟，多为殷商时期所铸造，通常为三件组编钟，形制如两块瓦相合，俗称“合瓦形”。它们是中国编钟的前身，已经具有演奏音乐的性能。到了西周时期，铸钟技术达到非常高的水平。最令今人惊讶的，是我国于1978年出土的铸于楚惠王五十六年（公元前433年）之前的曾侯乙编钟，它代表着中国古代编钟发展历程的一个至今难以逾越的高峰（见图12-21）。

[1] “Bell”词条参考：*New Encyclopeadia Britanica*, 1977.

[2] Sachs. *The History of Musical Instruments*. [London]1942: 71，200，222，279.

[3] 《山海经·海内经》：“炎帝之孙伯歧生鼓延，是始为钟。”

[4] 《吕氏春秋》卷五《仲夏纪·古乐》。

[5] 《十三经注疏本·礼记》卷三十一《明堂位第十四》：“垂之和钟”（垂为传说中尧之钟匠）。

图 12-21 曾侯乙编钟全景

中国古代,除合瓦形编钟外,也有圆形钟。秦以后,随着佛教传入中国,梵钟、教堂钟甚而朝钟,均是圆形钟。现存北京大钟寺的“万钧钟”就属于梵钟,重约42吨,铸于明永乐年间(1403~1424),也是世界上现存的最古老的大钟。

由于形状结构的不同,圆形钟与合瓦形钟的声音性质有很大差别。敲击梵钟、教堂钟、手钟一类圆形钟,声音悠扬长久,各种谐波分音很难衰减,其嗡音更不易消失。我们听教堂钟就有这种感觉:当钟舌打在声弓时,有一个响亮而刺耳的铿锵声,立即产生各种谐波分音的混合声;几秒钟后,高次谐波的分音消失,留下了深沉而模糊的嗡声。如果敲击时钟身摆动,又产生一种丁丁声,它和钟的各种声音叠加在一起(见图12-22)。

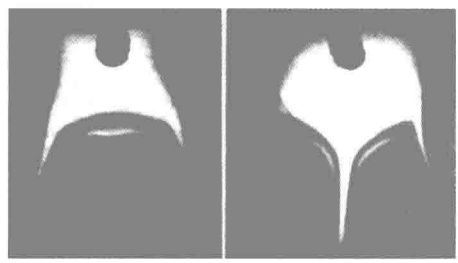


图 12-22 圆钟振动激光全息图 明亮处为节线所在

从声学角度看,圆形钟的振动模式可视为圆形的板,因此也可用径向和轴向节线理论来分析。荷兰人在16世纪对圆钟的调音进行了深入研究,它们发现钟的声音中包含了许多声音成份,并将这些声音成份给予命名:最低的音称为“嗡音”(Hum tone),有2个径向节线,人耳虽然能感觉其存在,但无法明判其音高;在嗡音上方的称为“基音”(Prime tone),决定钟的基本音高,有2个径向节线,一个轴线节线,由于在击钟的一刹那人耳就会感觉到这个音,因此又称其为“敲击音”(Strike tone)。除了这两个音,荷兰钟匠通过对钟形的调整,以及对钟壁作不同厚度处理的方法,还能使圆钟产生与基音构成协和关系的小三度、纯五度和大三度等其它泛音,从而使圆钟发出非常纯正的复合乐音的效果。有关学者的研究证实,圆形钟的振动频率,与金属材料的硬度、体积、密度、弹性模量等有关,与钟壁厚度成正比,与圆形壳体半

径及长度成反比[1]。

图12-23是一个经过调音后的圆钟振动节线分布和泛音情况：

图 12-23　圆钟振动节线分布示意图

中国编钟，又称“扁钟”，出自中国宋代科学家沈括“古乐钟皆扁如合瓦”[2]。合瓦形编钟最奇特之处，是在一个钟上可以敲击出两个乐音：在正鼓部位置可以产生一个“正鼓音”，在侧鼓部位置可以产生另外一个音。对西周时期的编钟而言，大多数情况下二者相差一个小三度或大三度（正鼓音低，侧鼓音高）。这种情况俗称为“一钟双音”。这种独特的发声方式自汉代以后逐渐失传，直到1978年曾侯乙编钟出土以后，人们才重新认知这一由我国古代钟匠创造的声学奇迹。著名已故音乐理论家黄翔鹏在重新发现“一钟双音”现象的过程中起到了极为突出的作用。

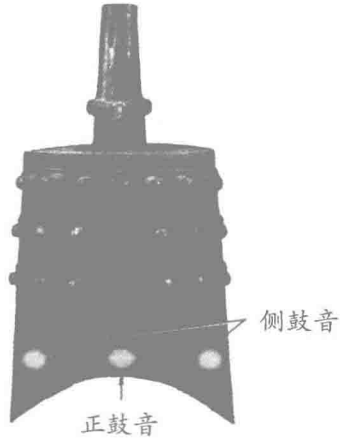


图 12-24　西周时期典型的合瓦形扁钟外形及正、侧鼓音敲击位置

[1]　Lord Rayleigh. *Theory of Sound*（Vol.1）.Dover Pub., 1929:464~465.

[2]　沈括：《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。

用板振动理论可以解释这种现象：板振动时除了整体振动外，还存在分段振动。对圆形钟来说，其结构决定了各个分段振动的能量总是混为一体，听起来永远是一个复合音。我国古代钟匠利用合瓦形的钟体结构，破坏了板体的统一性，同时采用挖燧或加厚板体局部的手段，用以强化各分段板体振动的能量，实际上等于把一块板从振动模式上分割成多块板，因此激励不同的板体就可以产生不同的音高（见图12-24）。

我国学者陈通、郑大瑞将合瓦形钟视为近似的椭圆截锥壳体，通过分析钟的弯曲振动，得到了中国合瓦形钟壳体振动公式。[1] 根据他们的研究，合瓦形钟的振动在某些方面与圆形钟相似，例如其振动频率与钟壁厚度成正比，与椭圆长轴的平方成反比。但他们又指出，合瓦形钟的振动模式与钟口的弯曲形状（即平于还是曲于）有较大关系，还与敲击位置关系密切。同一大小、厚度的钟，采用不同的钟口曲线或不同的敲击位置，其频率会有所不同。另外，在声音衰减方面，根据他们的研究，敲击合瓦形钟正鼓音位时，0.135秒后高谐波分音大部分消失；0.5秒时基本只有基音的能量在延续，1秒时基音也衰减了大半[2]。

合瓦形编钟表面上突出的钟枚，不仅有美化钟形的作用，在声学上还可以加强板体振动的对称性，使振动节线更为整齐。同时它可以起到强化振动负载作用，使声音较快衰减。由于上述合瓦形钟特有的声音特性，才使它成为可供演奏的乐器，而圆形钟不具备上述特性，因此不能作为乐器使用。

第六节 双音钟音乐性能之检测

我国古代编钟“一钟双音”的奇妙特征重现人间，引起了全球音乐界和科技界有关人士的注意，在古代双音钟音乐性能和音响特征的研究中也掀起波澜。自1983年始，笔者曾经参与主持数十次出土和新制双音钟的测音工作，涉及编钟近千件，年代跨数千年，总的印象是：这些编钟的音乐性能千姿百态，音响效果参差不齐，有的钟音响纯正、音高清晰，有些钟声音浑浊、音高不定，更有些钟音质低劣、不忍卒“听”，根本不具备“乐钟”的性质。为此，笔者开始思考这样一个问题：如何用客观测量手段来鉴别双音钟的音乐性能？或者说，一枚双音钟至少应当具备哪些条件？

1999年以前，我国制钟业对编钟音乐性能的评判基本上是沿袭古人之法“用耳朵听”。用耳朵来鉴别，优点是简单易行，但弊端也显而易见。声音是看不见、摸不着的物质存在，由于人对声音的主观意向具有多样性，同样一枚钟发出的声响可能有不同的评价。譬如在编钟的

[1] 陈通、郑大瑞：《椭圆截锥的弯曲振动和编钟》，《声学学报》第8卷，1983年第3期，第129~134页。

[2] 陈通、郑大瑞：《古编钟的声学特性》，《声学学报》1980年第3期，第161~171页。

延时方面，有的人偏爱余音长的编钟，有的人却对此持否定态度（认为编钟没有止音装置，余音长不利于演奏快速乐曲）；在音准方面，研究表明人对音高的感觉本身就有误差[1]，单凭听觉自然无法保证编钟有统一而恒定的音准；在音色方面，出于不同审美习惯，有人喜欢浑厚的钟声，有人则偏爱清亮，加之人们对这些感性词汇本身意义理解上的差异，更难求得意见的统一。由于上述原因，无论是古代编钟，还是新仿制的编钟，至今在音乐性能评价上也没有形成统一的鉴别标准，但在这方面的探索工作并没有停滞。

1999年，我国为迎接21世纪的到来，决定铸造一套由108枚青铜编钟组成的“中华和钟”[2]。为保证这套编钟的音响质量和音乐性能，有关方面决定制订一套科学的检测方案，笔者参与了方案制订和检测工作，愿以此作为探讨双音钟音乐性能鉴别问题的案例。

编钟作为一种有固定音高的打击乐器，一般需要检测的项目包括：音准、音色、音量和延时[3]，但了解编钟音响特点的人都知道，双音编钟并非如想象的那样，都能发出两个清晰而明确的不同音高。实际情况是：许多钟由于制造和调音不当，经常会出现正、侧鼓音互相牵扯（“声音打架”）的问题：敲击正鼓或侧鼓部时，除所敲位置能发出音高外，还会听到相邻鼓部发出的音高（即伴随音）。造成这种现象的物理原因是，编钟正、侧鼓音的敲击点与节线位置的重合性不好所致。

有经验的敲钟者通过精心选择敲击位置来弱化伴随音的强度，但如果属于铸造方面的“先天”原因，无论“后天”怎样仔细选择敲击位置也无法根除“混音”现象。这是中国双音编钟特有的一种音响形态，且对编钟的音乐性能（主要是音准和音色）影响极大。据此，在设立中华和钟检测项目时，笔者根据以往检测双音钟的经验，提出了“正、侧鼓音隔离度”概念，用以检测正、侧鼓音相互分离的程度。

经全体音乐监理[4]的研究讨论，最后确定的具体测量指标和方法如下：

一、音准检测

以十二平均律为立律基础，标准音 a^1=442Hz，音准允差值上层钮钟为 ±3音分，中层甬钟 ±5音分，下层镈钟为 ±8音分。

---

[1] 韩宝强：《音乐家的音准感—与律学有关的听觉心理研究》，《中国音乐学》，1992年第33期，第1~7页。

[2] 有关中华和钟的介绍见《2000年中华人民共和国年鉴》。

[3] 乐器的音乐性能检测项目并没有统一标准，往往视乐器本身性质和使用者的要求而定。一般而言，最基本的应包括音域、音准、音量、音色等项目，高级乐器还应包括音准稳定度、延时性、发音灵敏度、音色衰变性、音量衰减度、音量、音色平衡度、声音指向性等。

[4] 监理成员除笔者外，还包括中央民族乐团打击乐演奏员陈本智、中国艺术研究院音乐研究所研究员崔宪和王子初。

具体检测方法为以基音高度为主要检测对象。考虑到低音钟存在基音与主观音高常常不一致的问题[1],为突出中华和钟的音乐性,在检测镈钟音准时,首先由监理人员判断其主观音高,如果主观音高与基音在听感上基本趋同就视为合格,如果二者在听感上相差较多且难于修正,则以基音的高度为最后判定标准。

二、音色检测

主观听感无杂音、声音纯正、稳定。钮钟、甬钟和镈钟三者之间音色过渡自然。钮钟音色清亮、圆润,甬钟音色圆润、清晰,镈钟音色浑厚、饱满。

检测方法:以监理小组人员主观听感为主,辅之以频谱测量。

在人对乐音的四种感知属性(音高、音强、音色、音长)中,音色是最模糊的。目前人们对音色物理成因细节的了解还没有达到像音高、音强和音长的程度,频谱只是已知的较为重要的相关物理量,但还不能作为对音色评判的具有决定意义的依据,因而此项检测仍以主观感知作为主要评价手段。

三、音量检测

依高、中、低音区采用相应的音量标准,高音钮钟和中音甬钟音量区间同为25~50分贝(A计权,下同),低音镈钟为35~55分贝,每组钟音量应尽量统一。

检测方法:在距钟体下沿水平方向1米处设置话筒,以适当力度敲击各钟,以测得分贝值为基本依据,辅之以主观听感。

四、延时检测

依高、中、低音区采用不同的标准,高音钮钟的自然延时不超过2秒,中音甬钟的自然延时最长不应超过5秒;低音镈钟的自然延时不应超过10秒。"自然延时"的定义为声音由起始时的音量下降30dB所经历的时程。

检测方法:以客观检测为主,辅之以主观听感。

了解编钟的人都知道,编钟的延时太长会使钟声混杂(就像钢琴一直踩着踏板演奏一样),故本检测方案对最长延时作了规定。后来发现,有些编钟延时过短,声音缺乏余韵,同样也是一种音响缺陷。延时下限的设置问题须谨慎对待,在没有取得足够听觉心理实验数据之

[1] 低音钟一般指振动频率在100Hz(约为大字组G)以下的编钟。由于人耳听觉对低音区的音高反应极不敏感,因而往往借助泛音来判定基音的音高。但编钟是板振动类乐器,不像弦乐器或管乐器那样具有天然的谐音列,因此在一般情况下,钟的泛音与其基音不构成八度、纯五度等简单和谐的音程关系,此时低音钟听起来似有几个音同时鸣响。优秀的调钟大师可以把原本与基音构成不协和关系的泛音加以调整,使之能够与基音相谐,从而突出低音钟基音的音高。

前尚无法做出规定。

五、正、侧鼓音隔离度检测

该项检测的物理定义是“测量双音钟的敲击鼓音与伴生鼓音之间的音强差值”。根据听觉实验，最后确定：差值小于10dB为不合格，10~20dB之间为合格，20~30dB之间为良，差值在30dB以上为优。

检测方法：以客观检测为基本依据，辅之以主观听感。

隔离度检测标准的运用使双音钟音高清晰度的检测实现了数值化和规范化，进而保障了中华和钟全套钟的音响质量和音乐性能。目前，正侧鼓音隔离度检测已经成为国内一些制钟厂家例行的检测程序[1]，取得了良好效果。

[1] 目前运用该检测项目的有苏州华声乐器制造股份有限公司、武汉机械工艺研究所和武汉精密铸造股份有限公司等单位。

章后思考与讨论题

1. 根据你所掌握的乐器知识，请指出有哪件打击乐器具备了完整的声学构成。

2. 编钟的形状近似桶，为何在声学上归于类板体？

3. 根据板振动频率计算公式，如果想让相同大小的两块金属板发出相差大二度的音程，都可以采用哪些办法？

4. 根据膜振动发声原理，膜振动根本无法发出带有清晰音高的音，但为什么管弦乐队中的定音鼓可以有明确的音高？

5. 用声学原理解释中国先秦时期的编钟一枚钟为何能发出两个不同音高的乐音。

6. 中国古代编钟用青铜料制成，古代钟匠在青铜中加入金属铅以控制钟声的延音效果，请分析铅的多寡与延音长短呈何种关系。

7. 将基音高度相同的编钟与钢琴的音响做频谱分析，找出二者的主要差异。

8. 作为中国古代乐器之王，双音编钟在汉代以后逐渐消失，你能否从乐器声学角度找出相关的原因？

第十三章　电乐器声学特征

第一节　电乐器发展概述

“电乐器”（Electronic musical instruments），是与“声学乐器”（Acoustic musical instruments）相对的一个乐器种类，有狭义和广义之分。狭义的电乐器指单独的乐器主体，如目前常见的电吉他，电子键盘、音源合成器等；广义的电乐器不仅指乐器主体，还应包括所有与乐器相关联的装置，包括计算机硬件、软件、话筒、效果器、扩声设备乃至各种接口等。

从发声源的角度，电乐器又有“电子乐器”和“电扩声乐器”之分：前者指完全用电子振荡器为发声源的乐器，常见的乐器如电子琴、电子合成器、电子鼓等。后者指那些在常规乐器上加用电磁扩声设备而成的乐器，这些乐器的发声源依然是常规的振动体——弦或空气柱，常见的乐器如电吉他、电小提琴、电萨克斯等。从音乐角度讲，人们常说的“电子音乐”（Electronic music）是指由电子乐器制作的音乐，亦即是以电子振荡器为基础声源创作的音乐，而单纯由电扩声乐器演奏的音乐一般不包括在内。

图 13-1　电子琴（电子乐器）

图 13-2　电吉他（电扩声乐器）

总体上讲，电乐器是以美国和西欧等技术发达国家为主体发展起来的。美国麻省电器工程师凯西尔（Thaddeus Cahill，1867~1934）于19世纪末发明了世界上第一个电子乐器（首

次专利登记为1897年)。当时的专利证书形容其是一个“利用一个转动的电磁发声器产生简单波形的乐器”[1]。为了能发出复杂的波形,凯西尔制成一个电子混音器,将每个音响发生器产生的波形组合起来。当时这架电子乐器体形庞大,为了从麻省的实验室运到纽约市竟然动用了12节火车。凯西尔当时想利用电话线从专门为这架电子乐器命名的“电风琴大厅”(Telharmonium Hall)把音乐直接传送给听众。没想到,电风琴信号与电话线中的语音信号发生冲突,最后导致演出失败。

电风琴失败后不久,意大利先锋派作曲家瓦莱斯(Edgard Varese,1883~1965)在意大利和法国利用自然的噪声乐器举行了音乐会,但是瓦莱斯一直梦想使用电子乐器创作音乐。他写道:“如果有一种乐器能任由我随意支配,那么我就可以更清晰地感知对位线条的走向、音流的移动和声部的变化。”[2]

瓦莱斯自1916年以后一直生活在美国。他在说服美国公司进行电子乐器的研发方面做了许多努力,但收效甚微,无功而返。到了1935年,他几乎陷入长时间的绝望。直到1951年,在他68岁的时候,当他从一名匿名捐赠人那里获得一架磁带录音机之后,他才真正开始电子音乐的创作。1952年他开始创作具有里程碑意义的电子音乐《沙漠》和《电子音诗》,两曲先后于1954年和1957年问世,备受世人瞩目。与此同时,苏联物理学家特莱明(Leo Sergejewitsch Theremin)发明了一种电子乐器,被命名为特莱明琴,可以演奏各种不同形式的音阶,其与其它乐器的不同之处在于:这件乐器在演奏时,演奏者的手从不接触到乐器,而是通过双手在带电磁场的天线附近不断移动来改变音高(见图13-3)。克拉克·罗克摩尔(Clark Rockmore)是这件乐器的演奏高手,她曾用这件乐器在20世纪30年代与美国黑人歌唱家保罗·罗伯逊合作演出。

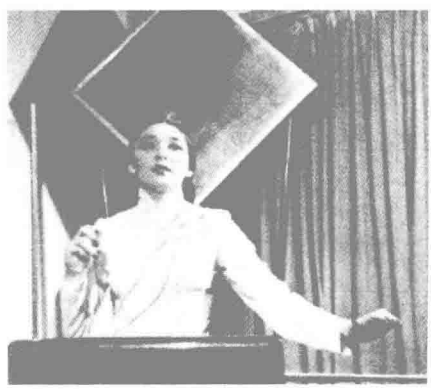


图 13-3 罗克摩尔在演奏特莱明琴

[1] Curtis Roads. *The Legend of Electronic Music.Neue Musiktechnologie*. Schott Musikwissenschaft, 1993:35.

[2] Edgard Varese. *The liberation of sound*. New York: Perspectives on American Composers, 1971:26~34.

在1920~1940年间，还诞生了数十架电子或电动乐器，由**玛特诺特**(M.Martenot)制造的电声乐器玛特诺琴(Ondes Martenot)可能算是其中的佼佼者，在法国作曲家**梅西安**(O.Messianen)的许多作品里曾被采用。还有一种电子乐器由于一个人的坚持使用而幸存下来，就是由**特劳特威恩**(F.Traurwein)和**萨拉**(O.Sala)研制的“混音琴”(Mixturtrautonium)。**萨拉**几次对其进行了改进，并在数十首作品中使用了它。在**希区柯克**导演的早期的电影《鸟类》中，**萨拉**用它发出特殊声效。

图 13-4　奥斯卡·萨拉在演奏混音琴

早期合成器都是用模拟电路制造的，即电路里存在的是电压的连续变化。模拟合成器的顶尖产品是由纽约 Moog 公司于20世纪60年代生产的“模块式压控合成器”(Modular Voltage-controlled Synthesizer)。**卡洛斯**(Walter Carlos)用 Moog 合成器制作的音乐《接通巴赫》(Switched-on Bach)，获得了巨大的商业成功，Moog 合成器由此声名大震，Buchla, ARP, Serge, Oberheim 等公司紧随其后，也生产出各种类型的模拟合成器。

第一架数字合成器的研制工作是**马修斯**(Max V.Mathews)和他的同事于20世纪50年代在美国新泽西州的贝尔实验室进行的。借助大型计算机，他们编制了音响合成软件《音乐Ⅰ》至《音乐Ⅴ》。其中《音乐Ⅳ》和《音乐Ⅴ》至今依然作为其它音乐 N 系列软件的核心模块在使用。

20世纪70年代中期，许多有关数字实时音响合成的技术得以实现。即音乐家可以实时操作合成器发出所要的音响。1976年，Dartmouse 数字型合成器(新英格兰数字合成钢琴的雏形)进行了第一次演示。**萨姆森**(P.Samson)设计的数字型合成器也于1977年在斯坦福大学问世。

1976年，由法国作曲家**布莱兹**(P.Boulez)领导的“声学与音乐研究中心”(IRCAM)在巴黎成立，并开发出以4A 为代表的一系列的合成器。4A 可以实时产生256个正弦波。很快又有4B，4C 和4U，直至功能强大的4X，被中心的作曲家们使用了十余年。80年代声音合成方面的主要成就体现在音响合成方面的进步，对传统乐器声音的模拟更加逼真。声学与音乐研

究中心研制的“圣歌”(Chant)系统是这方面的杰出代表,当法国前总统蓬皮杜夫人参观研究中心时,亦被圣歌系统发出的逼真的演唱效果所折服,圣歌系统还在一架钢琴伴奏下演唱了莫扎特歌剧《魔笛》中的一段咏叹调。

20世纪70年代后期,采样合成器已经出现。这种设备可以将声音转换为数字信号储存在芯片中。通过键盘储存的声音可以发出不同的音高,由此可以模拟出所有的声响——无论是传统乐器还是某种声效。

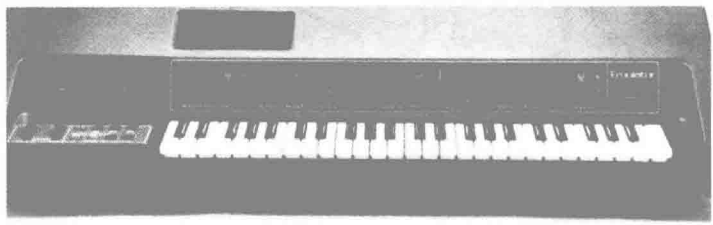


图 13-5 第一代采样合成器 E-mu emulator Ⅰ的外观

1981年低价位商业合成器问世。1982年,美国斯坦福大学的科学家开发了一种极为有效的方法用以合成出拨弦乐器和鼓类乐器的音响。通过线性预知编码(LPC)技术,合成器可以产生逼真的弦乐合奏的音响效果。Synergy数字合成器使用了加法合成与FM(频率调制)合成。卡洛斯又首先跳上了数字合成器的列车,在此仍以一曲《接通巴赫》对70年代流行的Moog合成器加以回应,她在1985年创作的《数字月球景象》(*Digital Moonscape*)为数字合成器真实再现交响乐队的织体树立了一个样板。

1983年,乐器工业开始引入“乐器数字接口”的概念,其英文缩写即今天大家所熟悉的“MIDI”。这是一种使合成器、计算机和其它外设之间能够进行数据传输的软件和硬件的通讯协议。由于MIDI的出现,计算机音乐在20世纪80年代以后有了长足发展。虽然MIDI对传统音乐表演来说尚有一定局限性,但对电声音乐的发展来说有着里程碑的意义。有关MIDI的深入介绍见本章第三节至第五节。

20世纪90年代以后,电乐器已经与计算机紧密联系在一起,各种电乐器发出的声响最后都可以输入到计算机的硬盘中,通过各种电子手段加以改变、调制、叠加,这个过程都是通过可视化手段来完成,对今天的作曲者和演奏者来说,电乐器似乎已经成为无所不能的“超级音响发声器”。

第二节 电乐器发声原理概述

在第一节中已经从发声源角度对电乐器进行了分类:电子乐器和电扩声乐器。电子乐

器的发声原理是由电子元器件组成振荡发声器，接通电源后会产生电流振荡，这种振荡电流经过各种控制电路的调制、扩大和叠加，便可生成符合音乐需要的乐音。从电路角度讲，电子乐器的音高主要由电子振荡器的振荡速度所控制，音强主要由电子放大电路控制，音色主要由电子调制、滤波和叠加电路来控制，音长则主要由触发控制电路来控制。

图13-6是一架模拟型电子合成器的工作原理框图：

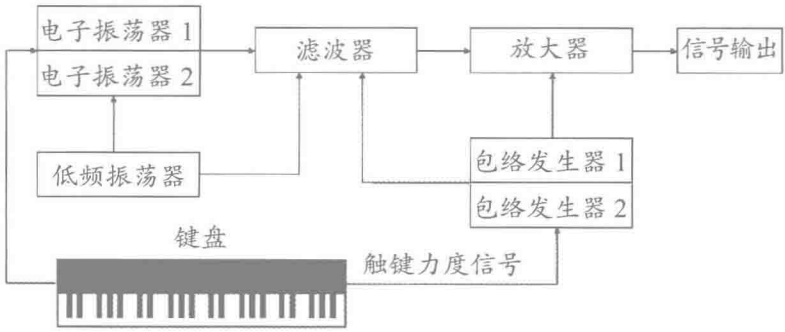


图 13-6　模拟型电子合成器工作原理说明

说明：当演奏者按下键盘中的某一琴键时，琴键下面的电路就将信号传送给振荡器1和振荡器2，产生相应的音高振荡频率；手指触键的力度信号也会同时传给包络发生器1和包络发生器2，并通知滤波器和放大器产生相应的音量及音色的变化；最后，声音信号通过放大器输出。图13-6中低频振荡器的作用，是根据演奏者的需要，对所有其它部分——振荡器、滤波器和放大器——进行调制，从而使合成器能够发出颤音的效果。

电子乐器之所以能够发出各种各样的乐器音色和各种效果声，关键在于电子乐器的设计者掌握了各种声音的合成方法。在前面的有关章节，我们已经介绍了人们对音色感知的一些要素，有客观物理的基础，也有主观听觉感知的影响。而客观条件中，又分频谱（泛音成份）和起始状态两种因素。

在电子乐器发展的早期，人们对音色的认识尚不完整，以为只有频谱一种因素对音色起作用，因而只专注于频谱研究。当时是用波形合成的方法来体现不同的乐器频谱类型，譬如，用正弦波合成长笛的频谱，用锯齿波合成弦乐器的频谱，用三角波合成单簧管的频谱等，但发现合成出来的音色与真实乐器有较大差距。人们这时候才开始意识到，音色问题并非只涉及频谱一个要素。随着对音色感知的深入研究，科学家逐渐意识到音色与声音起始的时间、声音延续时的强度变化包络、伴随噪音、拍音数量、混响时间等因素都有密切联系。这些研究成果直接推动了电子乐器在声音合成技术方面的进步，使各种电子乐器发出的音色愈加逼真。从这个意义上讲，电子乐器的发展反过来对音乐声学、特别是乐音合成和感知的研究起到了

促进作用。

随着数字电路的发展，上述模拟型电子乐器基本上已经被数字型电子乐器所取代。从乐器发声基本原理角度讲，数字型电子乐器与模拟型大致相同，只是前者在控制精度、可靠性和抗干扰等方面大大优于后者。

再来看电扩声乐器的发声原理。其发声源是常规的发声体——弦或空气柱，但共鸣放大系统则完全被电子放大电路所取代，最后通过扬声器发出声响，因此电扩声乐器实际上是声学乐器与电子扩声系统结合的产物。在拾取声源信号的方式上，电扩声乐器又可分为两种，一种是拾取声源的磁变化信号，这种方式主要使用在弦乐器上。具体方法是：在弦的下方置有电磁感应器，弦振动时，其频率和幅度变化通过感应器转变为电信号，经放大电路放大后推动扬声器发出乐音（见图13-7）。另一种是通过小型麦克风直接拾取乐器的声音信号，然后传导到放大电路推动扬声器发声，这种方式主要使用在管乐器上。

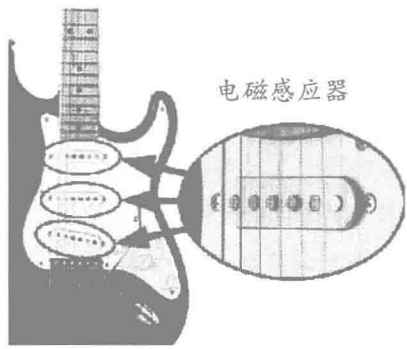


图 13-7 带有三组电磁感应器的电吉他

绝大部分电扩声乐器是由乐器主体和扩大器两部分组成，二者通过线缆连接。也有少量乐器将扩声线路、甚至扬声器都置于乐器内部，其优点是由于扬声器与乐器融为一体，演奏时声像定位比较真实。

电子乐器和电扩声乐器的声学系统可以简化为如图13-8：

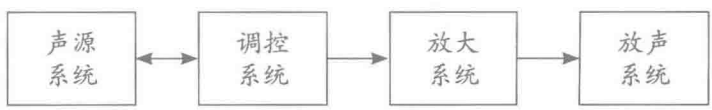


图 13-8 电子乐器和电扩声乐器的声学系统简化图

比较电子乐器和电扩声乐器的声学系统可以发现，二者在扩声和放声系统上基本一致，只是在发声源和音高调控方式上有根本区别。电子乐器的声源系统和调控系统都是由电子线路构成，而电扩声乐器则是由常规声学材料与电子线路混合而成。

如果单纯从声音表现性能和控制技术上看，电子乐器具有更大的优势，就音色变化来说，目前一架最低档的电子合成器也可以发出数百种不同乐器的音色效果，而一架高档采样合成器，更可以模拟出世间万物的声响，凭借其各种控制功能，也完全可以模拟出所有电扩声乐器的声音效果。尽管如此，电扩声乐器依然有着巨大市场，这主要有两个原因：第一，现场演出时观众仍然需要演奏者表现出的充满激情的视觉效果，特别是电吉他和电小提琴演奏者时常做出的那种即兴式的演奏技巧，对音乐现场的气氛能够起到强烈烘托作用。第二，人们对音乐表演从来就存在一种追求多样化的本能，而电子乐器一般是由键盘方式来演奏，无法满足人类对演奏形式多样化的追求。由此可以看出，人类对乐器的需要，并非仅出于对声音上的满足，还包含着对表演方式和视觉效果的审美追求。

对常规声学乐器来说，影响乐器声音质量的主要因素是振动体、共鸣体的材料和制作工艺，对大多数乐器来说，由于制作工艺相对比较简单，因此材料的优劣就成为影响乐器音质的主要因素。对电乐器的声音性能来说，由于声源（电子振荡器）和共鸣体（放大器）基本都是用相同的材料制成（当然也有不同档次之分），因此电乐器的音质优劣主要就取决于电路设计的理念和应用者驾驭这些乐器的技巧。譬如，熟悉电子合成器的人都知道，世界上不同厂家品牌的合成器都有各自的音色特点，背后反映出的就是合成器生产商的设计理念和审美追求。此外，如何利用合成器创造出具有艺术新奇感的音乐，则是对乐器使用者声音想象力和操作技巧的真实考验。从来没有哪种乐器像电乐器这样赋予演奏者如此重要的作用，同样是一架合成器，在有想象力和操作技巧的人手中可以弦管齐鸣、呼风唤雨，而在一个想象力平庸者或不通技术的人手中，充其量只是一架音色单调的键盘乐器而已。

第三节　MIDI 与 MIDI 乐器

“MIDI”是英文 Musical Instrument Digital Interface（乐器数字接口）四个单词的缩写，其技术含义是“电子乐器之间进行信息交换的标准”[1]。现在，这一标准不仅应用在音乐领域，也应用于一些与音乐相关的领域，如电脑灯光照明和舞蹈表演控制设备中。MIDI 最基本的功能就是传递电子乐器中的演奏控制信息，另一个功能就是传递与乐器音色参量、数字声频采样参数及其设定信息相关的数据。

国际 MIDI 标准委员会发布的 MIDI 标准，规定了电子乐器使用的硬件接口以及通信规范。即它规定了所用插口的类型，连接线的类型和接口电路的电压 / 电流值，由此可以将不同厂家的系统统一起来。装有 MIDI 接口硬件和 MIDI 标准通信软件的电子乐器就称为“MIDI

[1]　Eleanor Edited. Beyond the MIDI: *The Handbook of Musical Coods.* Cambridge MIT Press, 1997:1~5.

乐器”。今天在市场上出售的所有电子乐器，如电钢琴、电子合成器、电子键盘和电子打击乐器等，都预置了 MIDI 接口和相关软件，因此都可以称为“MIDI 乐器”。

由于今天的音乐制作越来越多地利用电子乐器，而电子乐器的演奏又离不开 MIDI 控制信息，久而久之，人们将有用电子乐器制作的音乐都统称为“MIDI”或“MIDI 音乐”。这一名称似乎是用来与“电子音乐”进行区分：“MIDI 音乐”只是表明音乐音响特征——用电子乐器制成，并无音乐风格和创作的含义；而“电子音乐”不仅有“用电子乐器和电子手段制作而成”的含义，同时还具有音乐风格和创作的内涵。真正意义的“电子音乐”，是指作曲家利用电子发声装置（并不一定是电子合成器）产生的声响为基本素材，通过各种电子手段加以发展、符合作曲家审美追求的音乐作品。这种音乐也可能与 MIDI 没有任何联系。由此而论，假如将莫扎特《第四十交响曲》用电子合成器加以改编、制作而成，就可以称为“MIDI 音乐”，而不能称为“电子音乐”，因为当年莫扎特并没有从电子音乐风格的角度来创作这部作品。因此，如果听到有人说“我这部作品是用 MIDI 做的”，其真实含义或许就是指这首乐曲是用电子合成器等设备制作完成，与电子音乐完全是两码事。

如今绝大多数家用微型计算机也安装了符合 MIDI 标准的音乐软件和硬件，因此也都可以与带有 MIDI 接口的合成器等电子乐器相连，加上专门的记录和编辑 MIDI 的软件，就可以成为电子音乐制作控制中心。需要注意的是，这种制作与传统的录音方式不同，计算机所记录的 MIDI 信息只是与声音相关的控制信息，而不是声音的本身。即微型计算机在运行 MIDI 音序软件后，可以记录来自 MIDI 乐器设备的一些表演和控制信息，例如按键信息（可以控制音高、音量和音长）、操作轮信息（可以控制滑音、波音效果）和音色开关的动作等信息。当微型计算机重放所记录的这些信息时，这些信息会指挥 MIDI 乐器设备发出相应的音乐声响。

下面介绍一些常用的 MIDI 乐器以及相应的硬件和软件。

一、键盘合成器（Synthesizer）

前面已经介绍合成器是由各种电路构成的电子乐器。其中的电路包括振荡器、滤波器、包络整形器和放大器等。这些电路都可以由电压（不是声信号）来控制其工作状态，控制电压可以由合成器的键盘或踏板来产生。这类合成器可称为键盘合成器。

（一）合成器的音色

合成器一般预置了一定数量的音色，代表这一音色的各种参量已被固化在内部的芯片中，一般不能进行直接修改。如要进行修改，首先要将数据读入到编辑缓冲器中，然后再进行编辑修改。有些合成器中的预置音色是可以直接修改的，修改后它还可以重新恢复到厂家预置的状态。合成器中的音色一般有两种，一种称为基本音色，另一种称为合成音色。合成音色是由

一个或多个基本音色合成得到的。由于合成器的内存有限，所以用户自己制作出的新音色可以存在外部的音色卡中，也可以用厂家提供的音色卡来扩充合成器可用的音色的数量。

合成器上的音色主要用在两个方面，一个是用来进行现场音乐演奏，另外一个就是进行音乐制作。

1. 用于现场音乐演奏。在用合成器进行表演时，可以选择基本音色，也可以选择合成音色。如选择前者，可以不考虑最大发音数的限制。一般在表演时多是选择合成音色，这时对合成音色中基本音色的合成方式有以下几种：

（1）单音色形式：这时合成音色只由一个基本音色构成，整个合成器键盘上分布的只有一种音色。

（2）叠层形式：此时合成音色是由两个或多个基本音色构成，这些基本音色以重叠的形式分布在整个键盘上。有些合成器中叠层形式的各基本音色对按键的力度或速率的响应表现不同，即不同的按键力度可以发出不同的声音。

（3）分断形式；这时合成音色也是由两个或多个基本音色构成，但是这些基本音色是被所设置的分断点断开而分布在合成器键盘的不同区域中。也就是说，当在键盘的不同区域内弹奏时，可能会发出不同音色的声音。其中最常用的是将整个键盘通过一个分断点分成两个部分，这样可以用左、右手同时演奏出两种音色。

2. 用于音乐制作。当用于音乐制作时，合成器是作为一个多声部音源供音序器使用。由于这时将合成器中的基本音色分配给多个声部，所以它要受到合成器音源模块的最大发音数的限制。如果音序器传送来的信息所要求的同时发音数超过了所允许的数量，那么有些音符信息就会被忽略掉。需要注意的是，不要将最大发音数与声部数相混淆。声部数是指音源最多可同时接收到的 MIDI 通道的数目。由于不同的 MIDI 通道可分别安排一种基本音色，所以这时合成器是工作在多音色状态下。

这种状态下，在音色运用上一般需要确定以下几点：

（1）音色：将所需的基本音色分到每个声部中去，即为每个声部选择一个所需要的基本音色。

（2）接收通道：为不同的声部选择接收的 MIDI 通道号，使音源中为该声部所选的音色能够响应音序器指定声道上的 MIDI 信息。

（3）音量：设定各声部中音色的相对输出电平。

（4）声像：设定各音色在立体声输出口中的分配比例，从而确定该音色在立体声声场中的声像。如果合成器带有多组音频输出口，那么还可以将每个声部的音色从指定的一个声频输出口输出到调音台的某一路上，这样可以很方便地在调音台上完成对各声部音色的加工处理和平衡。

(二)合成器的音色编辑与总体控制

虽然在合成器中厂家已预置了大量的音色,但是使用这些音色进行表演或制作时,经常还要对这些音色的一些合成参量进行编辑或修改,以满足特定的音乐形式的需要。

目前合成器的声音合成方式主要有两种,一种是靠调制振荡器、声音发生器或操作器所生成的基本波形来形成特定的频谱,最终模拟出各种乐器的音色,或创造出自然界中没有的声音;另一种是通过 PCM 波形发生器把厂家预置的各种波形真实地还原成声音,这些预置一般是对各种乐器进行的采样,也可以是模拟音色或自然音响的采样。前一种更侧重于音色的创造性,而后者更侧重于真实性。

1. 编辑音色的确定。在进行音色的编辑时,首先要确定一个与所需要的音色最接近的预置音色作为基础,然后对声音的音调进行粗调及微调,对于采样合成类的音源来说,其过程可以如上所述来进行选择、调整;而对于合成波形类的音源,如果采用调频合成法,则要确定"算子"——一种调制模式,即确定对多个操作器的各种排列形式,操作器的不同排列实际就是载波与调制器的不同排列。不同排列方式所带来的是谐波内容的改变。然后需确定的就是波形,它不是采样波形,而是振荡器产生的供调制用的一些波形,比如正弦波、锯齿波、三角波和脉冲波等。最后是对振荡器产生的信号频率进行粗调和微调。

2. 对音高的控制。在前一步确定了声音的基本音色后,合成器还可以对音调进行进一步的控制。

首先是通过音调包络的设定来控制音调,音调包络可以控制某一音色从按键到释放琴键这一过程中的音调起伏变化。其次还可以用低频振荡器对音调参量进行调制,从而使音调产生周期性的颤动,即颤音。这时需确定的参量主要有3个,它们分别是波形、频率和幅度,它们分别控制颤音的特征、速度和幅度。通过设置在合成器键盘旁边的摇柄,也可以对正在演奏的乐音进行实时的音高控制,如滑音、波音等。对一些演奏高手来说,用摇柄演奏的音响效果与自然乐器(如电吉它)毫无二致。(见图13-9)

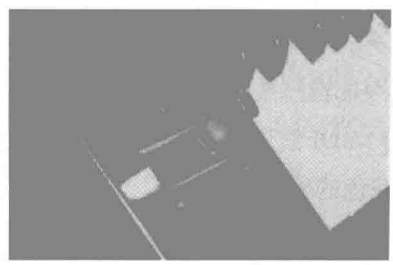


图 13-9 合成器的手柄,用于即兴控制音高、滑音和颤音变化

3. 对音色的控制。在发音部分确定了声音的基本音色之后,还可以对音色进一步控制,

这主要是通过压控滤波器来实现。常用的滤波器有高通、低通和带通滤波器。滤波器的截止频率可以通过截止频率包络来控制，利用这种包络发生器可以实现对一个音色从按键到释放琴键这一过程中的音色变化的控制。这一控制常用来对声音建立和声音衰减进行修饰。

4. 对音量的控制。合成器对音量的控制主要是通过控制压控放大器来实现的，压控放大器的控制信号可以来自包络发生器，也可以来自低频振荡器。用低频振荡器对音量进行调制，可引起音量周期性的变化，即产生震音。用包络发生器来进行控制时，对包络的建立、稳定、衰减等参量的设定，可以对声音的包络进行细致的修饰。例如声音建立的强弱、声音衰减的长短和声音稳定状态的维持时间等。

5. 音色的存储。通过以上的编辑处理，已基本上完成了对一个音色的修改。根据所需情况，应决定是否有保留的价值。如果需要保留，就应将修改后的结果存储起来，一般可以存在合成器的 RAM（可擦写存储器）中，或外置 RAM 卡中。也可以作为 MIDI 信息存入外接的音序器中。为了今后调用该音色的方便，一般要为新音色取一个名字。

6. 合成器的总体设定。除对某一音色的某些要素或参量进行控制之外，合成器还要对整个音色进行总体设定。这一步骤一般是在存储之前完成的。这些设定包括音量、定调、移调、弯音范围、调制设定 、声像和效果等。需要说明的是，传送的 MIDI 信息中是不包括效果信息的，如果在制作时想为某种音色加入效果，就必须采用各种方法单独加入，比如用调音台的外接效果器。在采样合成器中，某种音色会带有某种效果，这时这种效果已被作为该音色的特征而被采样，所以对于多音色合成器来说，一般不能给同时发声的某一音色单独加入某种效果。

有些合成器除了以上功能外，还预置了各种常用律制，如平均律、纯律及五度相生律，用户也可以自行定律。

二、音源（Tone Generator）

音源可以认为是不带键盘的合成器，但是它储存的音色更多，音色划分也更细。音乐家对音色的需求往往是无止境的，而键盘合成器中的音色往往不能满足他们的要求，因而就需要不断添置新的音源。音源中一些新的音色，往往成为音乐家的“至爱”。

三、鼓机（Electronic Drum）

学名“电子鼓”。在以 MIDI 设备为主体的声频节目制作系统中，鼓机主要担任乐曲节奏部分的演奏和编排。虽然在合成器中也预置了鼓类等打击乐器的音色，但是可选择的余地太小，同时对表演的情感模拟也很困难。

与合成器一样，鼓机也预置了各种节奏乐器的音色，并且将它们以不同的方式组合在一起，并编排在鼓机的乐器功能键上。这些乐器功能键都具有压敏特性，所以鼓机能根据敲击乐器键的不同力度来产生音量和音色的自然变化，得到非常逼真的打击乐声音。

鼓机本身具有许多编辑功能，例如复制一个节奏型、用另一种乐器替换演奏一个节奏型、节奏型的混合及连接等。用户还可以将自己编辑的节奏型存于 RAM 卡中，供日后使用。关于其它功能将在音序器部分加以介绍。

四、音序器(Sequencer)

MIDI 音序器，也称为时序器，它是用来记录 MIDI 主控键盘或从其它可发送 MIDI 信息的 MIDI 设备传送来的音乐信息和各种控制变化信息，或者重放所记录的 MIDI 信息数据，来使 MIDI 音源发出声音或响应各种控制变化信息，比如音色变化、音量变化及踏板动作等。从某种意义来讲，音序器相当于传统磁带录音系统中的多轨录音机。但多轨录音机记录的是具体的乐器(包括合成器)演奏时产生的电声信号，因而在重放时，就能如实地重放出所记录的乐器的音色；而音序器所记录的是 MIDI 键盘在弹奏时产生的音乐信息(键位、力度、踏板及其它有关的信息)，这些信息以规定的 MIDI 格式进行编码，因而在重放所记录的信息时，可以任意地选择音色来重放。

1. 音序器记录 MIDI 数据的方式。通常音序器记录 MIDI 数据的方式有以下几种：

(1)实时记录。这种记录方式是在演奏的同时，将传送来的 MIDI 信息记录下来。

(2)插入记录。这种记录方式与实时记录基本一样，只不过记录是在设定的插入点开始，在设定的插出点结束。通常所设定的插入、插出点是以小节、节拍为单位来确定的。

(3)步进记录。这种记录方式是传统录音中所没有的，它是将音符信息以步进方式——一个一个地——进行记录，完全不受录入速度、节奏的限制。适合用于记录实时演奏比较困难的复杂旋律或节奏。

2. 音序器记录数据的编辑。由于音序器记录的是 MIDI 数据，而不是声音，所以在记录以后可以很容易地进行编辑。编辑方式通常有3种：

(1)事件编辑。它是针对某一 MIDI 事件进行编辑，它可以对原记录数据进行改变、插入、删除，也可以改变某些音符的时值或者音色变化信息等。

(2)小节编辑。它对指定的小节进行编辑，包括删除、插入和复制小节，也可以在指定的小节中有选择地除去或改变某些数据。

(3)声道编辑。这种编辑方式允许对整个声道进行编辑，它可以进行声道间的数据互换、声道数据的复制、混合、擦除及连接等，也可以将指定的数据转移到另一声道上去。

音序器的内存有一定限度，其容量的大小是以能够记录的音符数来表示。如果音符信息中带有力度数据，则所能记录的音符数就要减少。对于音序器的记录和重放，可以选用不同的速度来进行，而且可以在进行过程中任意改变。在音序器中，速度是以每分钟演奏的1/4音符的数目来规定的。

随着计算机技术及软件开发的不断发展，在 MIDI 音乐制作系统中，人们越来越多地采用装有音序软件和其它制作软件的计算机来代替音序器。使用有音序软件的计算机有许多好处。首先这些音序软件大都是在 Windows 下运行的，所以可以以图形、多窗口的形式直观地显示出信息的记录、编辑等操作，其工作方式与传统的录音十分相似；其次由于计算机的内存和硬盘的容量都很大，所以不必考虑容量问题。同时，声道数可以增多，一般最小为16声道，也可以扩展成32声道甚至更多。编辑的能力和精度也比音序器的更强、更高。

此外，利用菜单命令，用户可以对乐曲文件及各声道进行整体的编辑，如复制、剪接、调用、存储、删除等，也可以对软件及硬件接口的通讯方式进行参数设定。

五、MIDI 硬件接口

大多数 MIDI 乐器采用的接口有三种形式，即 MIDI IN（信号输入）、MIDI OUT（信号输出）和 MIDI THRU（信号转接）（见图13-10）。

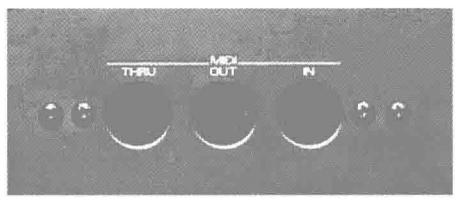


图 13-10　电子乐器上的 MIDI 接口

MIDI OUT 接口传送出的，是由设备本身产生或发生的数据。MIDI IN 接口的作用是接收来自其它 MIDI 设备的数据。MIDI THRU 是 MIDI 数据的中继转接口，其作用是直接将 MIDI 输入口接收的信号转接出去，它只对 MIDI 信号进行简单放大处理，而不进行其它的处理。在一些低档的设备上没有 MIDI THRU 接口，但可以通过独立的 MIDI 转接器提供多个 MIDI THRU 接口。

按 MIDI 标准的规定，MIDI 接口选用的插接件是类似一些高保真音响系统中所使用的5针 DIN 式（德国工业标准）插头（见图13-11）。规定中也可以使用专业的 XLR 插座，但在实际应用中很少使用。

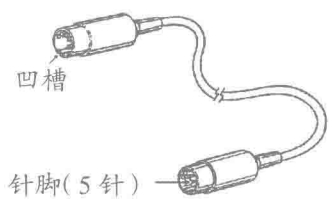


图 13-11　用于连接 MIDI 乐器的连接线（最长不能超过 15.24 米）

六、MIDI 设备的连接

MIDI 系统最简单的构成是将两件乐器用标准 MIDI 接线连接起来：将乐器 A 的 MIDI OUT 与乐器 B 的 MIDI IN 相连，乐器 A 通过 MIDI 线将自身的表演和控制信息（按键、踏板信息等）传递给乐器 B，乐器 B 就可以模拟出乐器 A 的动作。这样当把两个乐器的声音混合在一起时，就可以产生“加倍”或“叠层”的声音效果。厂家推荐使用的 MIDI 线的最大长度为15.24米，因为太长的连接线会导致信号质量恶化，造成同步出现问题（见图13-12）。

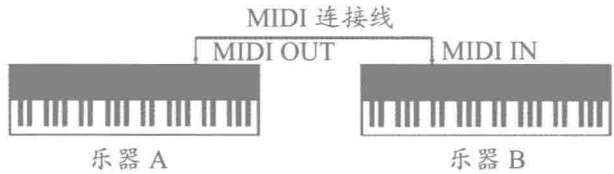


图 13-12 最简单的 MIDI 连接

可以利用 MIDI 转接口（MIDI THRU）来扩充系统，将更多的 MIDI 乐器加以连接。如图13-13所示：乐器 B、C 和 D 可以接收乐器 A 发出的指令信息。但要注意，在这种连接情况下，连接乐器的数目会受到乐器接收通道设定方式的限制。

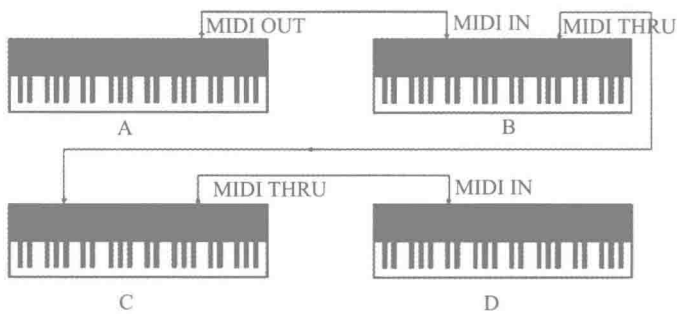


图 13-13 利用 MIDI THRU 接口连接更多 MIDI 乐器示意图

按 MIDI 标准规定，MIDI 的通道数为16。乐器可以设定在不同的通道接收方式，即可以接收某一个或某几个通道的信息，或接收全部16个通道的信息。一般来说，如果系统转接3件以上的乐器时，就要使用 MIDI 转接盒，以免累积的上升 / 下降时间误差影响 MIDI 信息脉冲宽度的工作周期。

第四节　MIDI 接口与信息解释

MIDI 乐器的数据传送是通过串行接口实现的。数字信号的串行传送与并行传送有所不同，串行传送时，数据是一个比特接着一个比特顺序传送的；而并行传送时，一个并行接口可以同时传送多个比特数据。因此串行传送只需一个通道即可实现，但传送的速度比较低；而并行传送需要多个通道来实现，一般用在高速通信中。

在 MIDI 标准中，规定采用串行接口作为数据传送的接口，主要是出于经济和实用性的考虑。因为 MIDI 标准规定的信号传送速率为31.25k Baud，即31.25kb 每秒，这一速率相对比较低，使用串行传送方式完全可以满足其要求。此外，采用串行接口可以降低设备的成本，安装也比较方便。

MIDI 信息使用的是串行异步通信方式。异步通信时，数据不带有与之相伴的时钟信号，所以要求接收设备不论在什么时候接收到输入信号都能实现与之锁定。

在异步通信接口中，发送设备和接收设备的时钟必须具有完全一样的比率，否则由于时钟上的误差可能会导致数据丢失，因此对时钟比率的严格规定是实现良好异步通信的基础。对于 MIDI 通信锁定频率允许的误差范围为 ±1%。此外，由于数据是随时发送的，并且在数据信息之间可能存在很长的空隙，所以数据信号必须带有开始和结束的标志，一般是采用起始和终止比特来表示。在每个数据字节前面加有起始比特，而在数据字节的后面加有终止比特。这样当接收设备识别出起始比特的上升沿之后，就立刻调整好其时钟，以便能在正确的时刻接收随后的数据，而终止比特则表明该数据字节传送完毕。MIDI 接口是采用通用异步接收 / 发送器（简写为 UART）来自动处理串行接口的数据。由于在大多数设备的内部都采用并行数据格式，利用它可以实现串行数据格式与并行数据格式间的相互转换。

MIDI 标准规定的串行数据传送速率（通称“波特率”）为31.25k Baud（31.25kb/s），数据的传送是单方向的，即由发送设备到接收设备。标准的 MIDI 信息一般包含有1至3个字节，特殊的信息可能由更多的字节构成。

以下是对 MIDI 信息较为详细的解释，读者若想对 MIDI 信息有更全面了解，可以继续阅读下面内容。

一、MIDI 通道

从图13-13可以看出，乐器 B、C、D 接收由乐器 A 送来的信息，这时乐器 A 称为控制设备或主控键盘。这种系统连接时就要考虑如何使不同的受控乐器响应不同的信息数据。

MIDI 信息是由若干字节组成的，每个字节均有其特定的作用。在一个大型系统中，有时

用音序器作为主控器，这时在 MIDI 的数据总线上出现的信息量很大，而这些信息并不是所有的乐器或设备完全需要的。为了解决这一问题，MIDI 标准规定采用16个 MIDI 通道来传送 MIDI 信息，这样 MIDI 设备就可以根据需要将其设定成对指定通道上传送的信息产生响应，而不去响应其它通道上传送的信息。

一般 MIDI 设备可以设定在指定的通道上发送或接收 MIDI 信息，也可以设定在所有16条通道上都接收 MIDI 信息。

二、MIDI 信息的构成与格式

从大范围讲，MIDI 信息分两大类型：即“通道信息”和“系统信息”。通道信息中又包含“声音信息”和“模式信息”，系统信息中又分“实时信息”“共用信息”和“专用信息”。它们之间的关系如图13-14所示：

图 13-14　MIDI 信息关系图

声音或音色信息是用来控制乐器声音的信息，它被送往声音通道；模式信息是表示乐器的声音信息响应的信息，它被送往乐器的基本通道。

共用信息是对系统的所有设备都起作用的信息，实时信息也是对系统中的所有设备起作用的信息，它只包含状态字节而无数据字节，它可以在任何时刻传送，即使在具有不同状态的信息字节之间也可传送；专用信息是乐器制造厂提供给使用者的信息，它可以具有任意数目的数据字节。

MIDI 信息有两种基本类型：“状态字节”和“数据字节”。状态字节以逻辑“1”开始，而数据字节以逻辑“0”开始，这样可以区别哪个字节为状态字节，哪个字节为数据字节。MIDI 信息的构成情况如图13-15所示：

1sssnnnn	0xxxxxxx	0yyyyyyy
状态字节	数据字节	数据字节

图 13-15　MIDI 信息的构成

标准的 MIDI 信息一般由3个字节构成，但也有些信息是由1或2个字节组成的：可能没有数据字节，或只有1个数据字节；也有的信息可能不止3个字节，即有2个以上的数据字节。通常情况下，第一个字节总是状态字节，然后接下去的就是数据字节。状态字节中，“SSS”代表状态信息，“nnnn”代表通道号码；数据字节中，“xxx…”和“yyy…”代表数据信息。

每个字节中都包含8个比特(bit)。在状态字节中，除了标志为“1”占1个比特外，还有7个比特用来表示在指定通道上的 MIDI 信息类型，它可以表示128种可能的信息。实际上在这7个比特中，头3个用以表示动作状态的类型，后4个表示通道号：由通道1至通道16。

表13-1、表13-2给出了国际 MIDI 标准委员会所规定的 MIDI 标准信息(1.0版)及其解释。其中，MIDI 信息采用十六进制来表示。

表 13-1　MIDI 数据信息(指定通道)

信息名称	状态字节	数据字节 1	数据字节 2
离键信息或音符通 Note on	8n	0kkkkkkk 键位	0vvvvvvv 离键速率
按键信息或音符断 Note off	9n	0kkkkkkk 键位	0vvvvvvv 离键速率(力度)
复音键后响应 Polyphonic aftertouch	An	0kkkkkkk 键位	0vvvvvvv 键后压力值
7bit 控制器 / 开关	Bn	40（维持踏板） 41（滑音） 42（延音踏板） 43（弱音踏板）	}00-3F（断） }40-7F（开） }00-3F（断） }40-7F（开）
		60（数据增加） 61（数据增加） 62（未定义参量控制器） 63（未定义参量控制器） 64（已定义参量控制器） 65（已定义参量控制器） 79（重新设定所有控制器）	7F 7F 最低位 最高位 最低位 最高位 7F
通道模式 Channel modes	Bn	7A（本机控制）	00（关)/7F（开）
		7B（所有音符断）	00
		7C（全通道模式断）	00
		7D（全通道模式通）	00
		7E（单音色模式)(通道号)	00-0A
		7F（复合音色模式）	00

（续表）

信息名称	状态字节	数据字节 1	数据字节 2
音色变化 Program change	Cn	0rrrrrrr（音色号）	——
通道键后 Channel aftertouch	Dn	0vvvvvvv（压力值）	——
弯音轮 Pitch wheel	En	0vvvvvvv（最低位）	0vvvvvvv （最高位）

表 13–2 MIDI 系统信息

信息	状态字节	数据字节 1	数据字节 2
系统专用信息：			
系统专用信息 系统专用信息结束	F0 F7	厂家识别码 ——	数据 +++……
系统共用信息：			
歌曲指针 歌曲选择 调谐请求	F2 F3 F6	0lllllll（最低位） 0sssssss（歌曲号码） —	0hhhhhhh（最高位） —
MIDI 时间码 1/4 帧格式	F1	数据	—
系统实时信息：			
时钟 （小节结束） 开始 继续 停止 启动传感 系统置位	F8 F9 FA FB FC FE FF	MIDI 1.0 标准未定义	

三、通道模式

尽管通道模式信息与控制变化信息有相同的状态字节，但是两者的意义并不相同。通道

模式信息规定了乐器在特定的通道上接收信息的方式：

1. 本机开关(Local on/off)。主要用来将乐器本身的键盘与其音源部分接通或断开。当本机开关接通时，键盘的输出与自身的音源接通，这时乐器可以用自身的音源来演奏。当本机开关断开时，这时键盘的输出不控制自身的音源，而从 MIDI OUT 口送出；与此同时乐器自身的音源受控于 MIDI IN 口上接收到的 MIDI 信息。在这种情况下，乐器被分成两部分，即不带音源的主控键盘和不带键盘的音源。这种设定方式在大的音序系统中是很有用的，因为并不是总想听主控键盘演奏的并由自身音源发出的所有声音。

所有音符断开(All note off)的作用就是关掉在指定通道上的每个音符的声音。这种作用可以保证当 MIDI 系统发生问题时该乐器完全不出声。

2. 全通道模式关闭(Omni off)。乐器将根据其控制设定的情况，确保只对与自身通道号匹配的通道上的数据有反应。

3. 全通道模式打开(Omni on)。乐器将接收来自所有 MIDI 通道上的信息。换言之，乐器此时将忽略状态字节所表示的通道号信息，而对任何通道传送来的信息产生动作。

4. 单音模式(Mono mode)。将乐器设定成一次只能发出一个音符的模式，它与一次可以发出多个音符的复音模式(Poly mode)相对应。单音模式是针对多音色乐器的。所谓多音色乐器，是指它能一次发出一个以上的音色，它不仅能同时发出多个音符，而且每个音符有不同的音色，接在单音模式信息后面的数据字节指定了有多少个音色被安排到相邻的 MIDI 通道上。例如，数据字节设定成4，那么就有4个音色安排到相邻的 MIDI 通道上，选定的通道是从基本通道开始向后再加上3个通道。特殊的情况是当数据字节为0时，如果乐器有16种音色的话，那么就可以为16个 MIDI 通道的每一个安排一种音色。这时，单独一台多音色乐器就可以当成16台单音色乐器来使用，但是在比较廉价的系统中，所有这些音色可能被混合在一条声频通道上输出。

5. 复音模式(Poly mode)。乐器能够在一条 MIDI 通道上同时发出多个音符。当同时发声的音符数超出乐器的限度时，乐器的响应不尽相同，有的乐器是用新的音符来取代最先按下的音符，也有的乐器是拒绝发出新的音符。较智能化的乐器将检查当前是否有同样的音符在发声，它只接收已经不发声的新音符，更加智能化的乐器是利用新接收的音符来取代最弱的或音量最低的音符。

四、系统专用信息

系统的专用信息是针对不同的制造厂家和不同的乐器而设立的。其中可以确定的内容就是专用信息的开始和结束，但有时也有例外，例如 MIDI 时间码和采样转储(Sample Dump)等作为通用信息的系统专用信息。

由设备产生的系统专用信息将自动地由 MIDI OUT 口传出，而不从 MIDI THRU 中传出，因此发送设备与接收设备间的连接要十分仔细。有时为了能实现发送设备与接收设备间的双向通信，还必须将接收设备的 MIDI OUT 与发送设备的 MIDI IN 相接，这样接收器可以通知发送设备它已准备接收信息或已正确接收信息，从而达到可对数据的流向进行控制的目的。

系统专用信息是以状态字符 FOH 开始，然后是厂家识别码（Manufacturer ID）。厂家码是各电子乐器制造厂家的标志，它可以从 MIDI 委员会资料中查得，如 Roland 的 ID 码为 4lH，E-mu 的 ID 码为 18H，YAMAHA 的 ID 码为 43H，Kawai 的 ID 码为 40H 等。接在厂家 ID 码后的字节为一系列数据字节，其数据字节的数目要根据厂家的需要来定，在 MIDI 标准中没做规定。系统的专用信息可以由另一个状态字节或 F7H 来结束，对于比较长的系统专用数据的转储，推荐使用某种格式的误差检测配合工作。在大多数系统中，一般使用检测方法来检查是否数据已被准确接收，如果发生接收错误，可以要求发送设备再次发送该信息。

在最近的 MIDI 标准中，已经对厂家 ID 的 3 个最高数码安排了特殊的功能，这就是通用非商用信息（ID：7DH）、通用非实时信息（ID：7EH）和通用实时信息（ID：7F）。其中，通用非实时信息是在将采样转储成指定的格式时使用，而通用实时信息是在处理与 MIDI 时间码相关的内容时使用。

五、系统实时信息

MIDI 的主要作用之一就是在系统中传送时间数据信息。在过去的各种鼓机和音序器中使用单独的“同步”接口，来传送一定速率的时钟信号，最常见的就是四分之一音符脉冲码，即 PPQN（Pluses-Per-Quarter-Note）码。但是如果各个厂家生产的乐器速率不同，就不能采用这一方法来同步。

现在进行系统的同步，是使用系统实时信息以及系统共用信息中的“歌曲位置指示器”来完成的。当 MIDI 系统与多轨录音机或录像机的专业声、视频制作系统相结合之后，就只能靠 MIDI 时间码来完成真正意义下的同步。

系统实时信息是控制整个 MIDI 系统，使系统能按照时序来执行一系列工作。

在 MIDI 标准中，规定在实时信息中传送 MIDI 时钟字节。MIDI 时钟信息只有一个状态字节 F8H，并由控制设备在一个 MIDI 节拍内向外发送六次，即 1MIDI 节拍 = 6MIDI 时钟。一个 MIDI 节拍的时间长度相当于音乐中的十六分音符的时值。因此，由 MIDI 时钟字节体现出的时间增加是与在特定的条件下的音乐进行中所经历的时间相联系的。它是相对的时间概念，而不是绝对的时间概念。也就是说，对于在指定速度上的音乐进行中，MIDI 节拍数

代表了一定的时间值，但是当速度发生变化时，MIDI 节拍数代表的时间值也必然发生变化，此外，状态字节 F8H 有其特点。它可以临时中断当前的状态来随时发送，而当接收设备处理完 F8H 的信息后将自动转变成中断前的状态。

系统实时信息中的 FAH 所代表的开始信息，是控制器发出的使系统的每个同步设备执行“开始重放已录歌曲”的命令，它使整个系统完全返回到时序的起始点后同步重放已录的歌曲。由 FCH 所代表的“停止信息”则是终止在同步设备上重放的歌曲。FBH 所代表的“继续信息”则使系统在“停止信息”的响应位置上继续重放下去。

“启动传感信息”也是由一个状态字节 FEH 组成的。作为伪“状态”字节，它可以在线路上没有任何其它数据时，以每300ms 传送一次（大约每秒钟传送3次）的速率来传送。它的作用是当控制器不起作用时，对接收设备加以保护。

并不是所有设备都能传送“启动传感信息”，但是接收器的软件能够检测出该信息的有无。接收器在未收到这一信息之前是按正常工作的，一旦收到了这个信息，接收器将关闭掉所有音符，而不管这些字节的状态如何。如果以后接收器再未接收到“启动传感信息”，那么在300ms 后接收器就恢复到正常工作状态。这一功能在传送 MIDI 数据时，如出现了 MIDI 线被拔出的情况时是很有用的，它可以使声音不再无休止地响下去。

六、系统共用信息

系统共用信息中的“歌曲位置指示器”（Song Position Pointer）信息 F2H，在较复杂的系统中是比较有用的，它可以使控制器告诉其它设备当前歌曲进行的位置。一台好的音序器或同步器都应该能够向其它可同步的设备传送“歌曲位置指示器”信息。例如，由歌曲的开始向后“快进”25小节，这时系统中的其它以此为基准时钟的设备就必须知道从什么地方重新开始重放时序数据。

“歌曲位置指示器”是一个内部寄存器，它存有从歌曲开始后的 MIDI 节拍数，因此它所表示的是相对于音乐的时间信息，而不是绝对的时间信息。它不是以秒来表示歌曲的实际位置，而是用两个数据字节来表示歌曲的位置。由于数据的最高位必须为零，所以共有 14bi t 可以使用，即能够计数的最高限为16384个 MIDI 节拍。在实际使用中，它常与“歌曲选择”信息 F3H 相配合，来确定当前的位置对应的是哪首歌曲。

“歌曲选择” F3H 是用来指定演奏的乐曲和音序器号。

“调谐请求” F6H 是对模拟合成器的振荡进行调谐。

七、系统同步与 MIDI 时间码

从前面的解释可以看出，不论“PPQN 码”，还是“歌曲位置指示器”，所表示的都不是绝对

时间。这就给 MIDI 音乐制作系统与传统的专业录音的结合带来很大不便。例如,“歌曲位置指示器”可以精确地表示出整个音乐系统的运行方向,因为它的每次的动作都与特定的拍子相对应。但它没办法表示出发生这一动作的特定时刻。再如,在音、视频节目制作中,如果想通过 MIDI 系统来为视频中的特定画面混录音乐和效果声,就需要录像机能同步 MIDI 系统,换言之,即能用特定画面来触发音乐或效果的重放。

一般来说,效果声应该准确地与特定画面相对应。如果效果声是由音序器在歌曲开始重放之后经过指定拍子后触发的,那么音乐发生了节奏上微小变化必然就会导致触发点的绝对时间变化,所以为了能够取得实时同步,就利用一个以小时、分、秒和帧组成的时间信息来取代时钟和“歌曲位置指示器”。现在这个问题已由 MIDI 时间码(MTC)解决了。在 MIDI(1.0)标准中没有规定 MIDI 时间码信息,但在该标准的修订本中规定了 MIDI 时间码,这就是原 MIDI (1.0)标准的系统共用信息中的 FIH。

MIDI 时间码有两个特定的功能,其一就是将通用的 SMPTE/EBU 时间码变成 MIDI 协议中规定的数据格式后分配给 MIDI 系统网络中的 MIDI 设备;其二就是提供传送所谓“设定”信息的办法,使微型计算机能够在确定的事件发生时刻将各接收设备同步起来。这样,接收设备就可像接收音色信息那样读出输进来的 MTC 信息(它可能是由磁带录音机的某一声道上记录的 SMPTE/EBU 时间码转换来的),并在某一特定时刻执行预选编制的事件。

八、运行状态

当大量的信息通过一条 MIDI 总线来传送时,由于串行传送的原因,必然会产生延时。例如同时发声的各和弦音符是逐一传送出去的。如果要充分发挥串行传送的优势,就要尽可能减少传送的数据量,以确保延时尽可能短,同时也要避免总线上出现不必要数据所引起的设备过载情况。

运行状态是一种公认的减少数据传送量的方法,这种方法可以被所有的 MIDI 软件承认。它的基本原理是,当控制器发送出一个状态字节之后,此后一直没有改变状态,那么在此状态下的信息传送,就没有必要反复传送该状态字节了。比如要传送一串按键信息,那么只需在这一串信息的最开始处传送按键信息的状态字节就可以了,即传送:[按键状态 - 键位 - 速率][键位 - 速率][键位 - 速率]……

九、信息优先权

为了保证最重要的信息能首先处理,MIDI 规定了根据信息的类型确定的信息处理优先权。其先后次序为:

复位信息；

系统专用信息；

系统实时信息；

系统共用信息和通道信息。

第五节　家庭 MIDI 音乐制作系统

随着 MIDI 技术的日益成熟以及硬件价格的下降，MIDI 乐器逐步走进普通人的家庭。按目前市场价格，花2万 ~3万元左右就可以拥有一套 MIDI 音乐制作系统，包括一台计算机（内置声卡和音序器软件），一个键盘合成器，一个音源，以及相关的周边设备（见图13-16）。

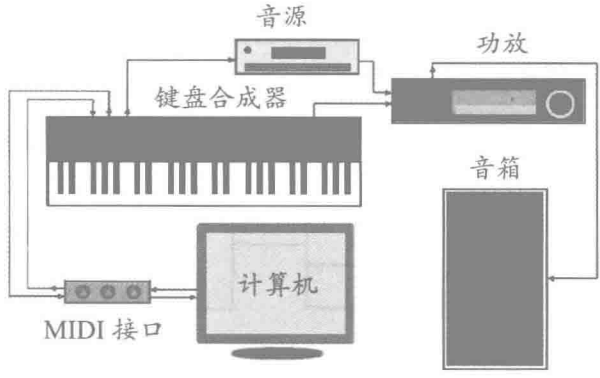


图 13-16　家庭简易 MIDI 音乐制作系统

设备的具体情况如下：

作为主控键盘，首先要求它必须能够传送出所有需要的控制器信息，例如速率、键后响应、弯音、调制轮、踏板、音色变化和来自其它模拟推拉衰减器或控制轮的信息。其次要求它是一个全音域的键盘，以便能最大限度地发挥接收音源的合成能力。再次就是主控键盘可以是一台键盘合成器，也可以是一个不带音源的控制键盘。如果使用的是键盘合成器，就可以通过本机开关的控制，使其内部的音源在传送控制信息的同时发声或不发声。

对计算机而言，应当装有声卡和音序软件，其作用是将 MIDI 数据与计算机语言进行相互转换，并可以存储 MIDI 信息和合成器发出的音频信号。声卡的质量对最后的音响效果至关重要，因此应选择中档以上的产品。此外，还需要一台立体声功率放大器和一对音箱。

在条件允许的情况下，再增加1~2个音源、1个鼓机、一个8或16轨调音台、效果器和多轨录音机等设备，就可以录制更为高档的音乐作品（见图13-17）。

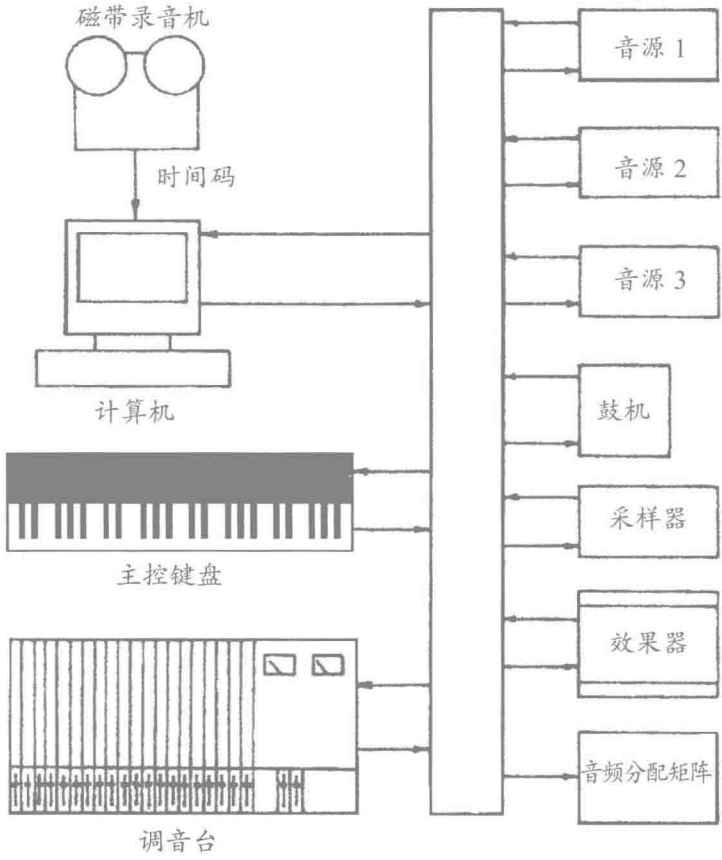


图 13-17 较为高级的 MIDI 音乐制作系统

目前常用的调音台都可以响应由 MIDI 系统送来的计算机设定或记录的控制数据，这一控制数据是从特定的 MIDI 通道上接收来的。自动化混合数据可以在所有乐器声道录入完毕之后再去记录。在这种情况下，自动化混合数据可简单地与主控键盘的同步时间数据混合在一起，这样自动化混合数据就能够与同步重放的已录声轨相同步。为了解决音序器同步需要混合数据、时间数据和主控键盘数据的问题，应将混合数据与主控键盘数据相混合，然后通过第二个 MIDI 输入口再与时间数据一起传送给计算机，这就是采用 MIDI 数据混合器的目的。调音台和主控键盘的 MIDI 输出接到混合器的两个输入口上，然后将混合器的一个输出接入计算机的输入。

在利用上图所示的系统进行多轨录音时，其步骤如下：

1. 在多轨录音机一条声道上记录时间码信息，它是系统的同步信号。

2. 将音源设定在不同的通道上，以响应主控键盘从不同通道送来的 MIDI 信息，并且选好对应的音源音色，并将主控键盘演奏的数据记录在计算机控制器中的音序文件中。

3. 将各个声部的声音记录在多声道的相应声道上。当多轨录音机录音时，音源和鼓机响应计算机送来的 MIDI 信息，音源和鼓机产生的电声信号送到调音台，经过适当调整后记录到多轨录音机的各个声道上。当然，也可以在后期合成时直接混合成立体声信号，而不必记录到多轨录音机上。

4. 同步记录非 MIDI 乐器的其它乐器声音。有些音乐要求用一部分普通乐器来演奏，比如民族乐器、歌唱声等。

5. 后期合成。如果所有声部均记录在多轨录音机上，那么这时的后期合成就与传统的多轨录音的后期合成完全一样了。如果音源或鼓机的声音没记录到多轨录音机上，就可以利用同步功能，将音源或鼓机的声音与多轨录音机的重放声音合成在一起，制成原版录音母带。

如果在上述系统基础上再添置一台音频工作站（Audio Station），就可以从音频角度对一些 MIDI 乐器无法产生的声音，如对人声、过去保存下来的声音信号以及 MIDI 乐器发出的音乐信号进行统一的音频编辑加工，这样的音乐制作系统就可以称得上是真正的“超级音乐制作中心”了。

章后思考与讨论题

1. 从乐器声学构成角度看，电乐器与声学乐器之间在发声原理上有何本质的不同？

2. 从乐器声学构成角度分析，影响电乐器发音质量的重要因素有哪些？

3. MIDI 信号与音频信号的本质区别是什么？二者之间用什么要素来关联？

4. 电吉他没有共鸣系统，为何也能发出悦耳、洪亮的音响？

5. “所有电子乐器能够发出的声音，本质上都来自对传统声学乐器的模拟”，你同意这种说法吗？

6. 随着电乐器进一步发展，有朝一日它能否完全取代传统声学乐器？

第十四章　歌唱声学研究

第一节　嗓音构造概述

人类歌唱的生理基础是人的“嗓音器官”（Voice organs）。从乐器声学的角度也可视其为一件乐器：声带是振动源，呼吸组织是激励系统，人体中的各个腔体——口腔、咽腔、胸腔和头腔等构成了共鸣系统，而神经和肌肉组织则属于掌管乐音变化的调控系统。

可以想象，作为人类与生俱来的、能够发出乐音的器官，在其它乐器出现之前嗓音系统肯定是最早用来表达艺术声音的乐器。或许在人类语言出现之前的远古时代，人类就是通过嗓音的变化发出各种不同的音调，来表达喜、怒、哀、乐和生活的需求，以此作为人与人之间联系的工具。随着历史的推演和科学文化的发展，人们创造出了形形色色的乐器，但人声乐器仍然是一切乐器中的佼佼者。甚至可以这样说，从感情表现的范围来看，其它一切乐器都不过是在尽力模仿人声乐器而已。

在嗓音发声的过程中，无论声带的紧张与松弛，还是共鸣腔的打开与关闭，人们都无法用眼睛来观察，只能由歌唱者通过对声音和神经系统的感知来调控，再加上歌唱者对自己声音的判断有一定主观性（由于骨传导的作用），因此说人声乐器是所有乐器中最难掌握的乐器也不为过。从另一个角度看，由于人声乐器就长在人的身体上，可以由人的感觉来随意支配，只要生理上健全就具备了歌唱的条件，心里想唱就可以随时随地放声高歌，因此人声乐器也可以说是所有乐器中最容易得到且“物美价廉”的乐器。

在萨克斯－霍恩博斯特尔分类法中，嗓音被归为气鸣乐器中的自由簧类，即声带可看作一对自由式振动的簧片。其实人在发声时，不仅声带在工作，口腔、咽腔、胸腔、头腔内的各种肌肉都参与其中。喉内肌和喉外肌同时收缩，声带被拉紧、拉长，两片声带靠拢，肺部气流从两片声带之间的缝隙中喷出，从而激发声带。声带的振动要经过各个共鸣腔体的耦和以及肺活量的控制，使声音的音高、音色、音量和音长能以一种艺术的方式表达出来（见图14-1）。

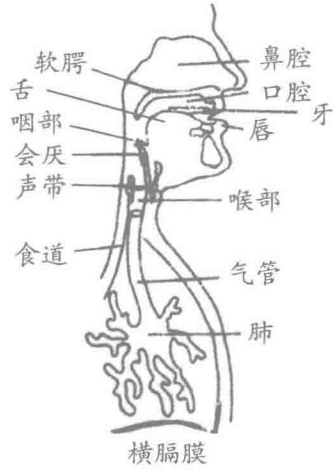


图 14-1　人体嗓音系统生理结构示意图

从生理角度讲，嗓音的发声源是在喉部，由7块软骨构成，即甲状软骨、环状软骨、杓状软骨、会厌软骨、小角软骨、楔状软骨和麦粒软骨。喉的外形由甲状骨的2个方形翼组成，它们在前方融合成“V”字形，上方有一个切迹，声带平卧在切迹下面。这“V”字形的部分称为“喉结”，俗称“苹果骨”。甲状骨的后方上下各有两个突出的角，称为上角和下角。下角通过韧带与环状软骨连接，在甲状骨的前摆中起固定作用。

喉肌可分为两大类，即喉外肌系和喉内肌系。喉外肌系不直接参与发声。喉内肌系顾名思义，是指喉内的环甲肌、甲杓肌和一组杓肌，它们直接参与发声。环甲肌是发自环状软骨而附着在甲状软骨下前方的肌肉。它的纵向拉扯使甲状骨前摆，从而拉长声带使声带变薄，张力增加，易于发出高音。甲杓肌是发自甲状骨内侧，另端附于杓状软骨肌突上的肌肉。它的膜质外缘即声带。甲杓肌的收缩使声带缩短变厚，易于发出低音。杓肌有一组，它们起到启闭声门的作用(见图14-2)。

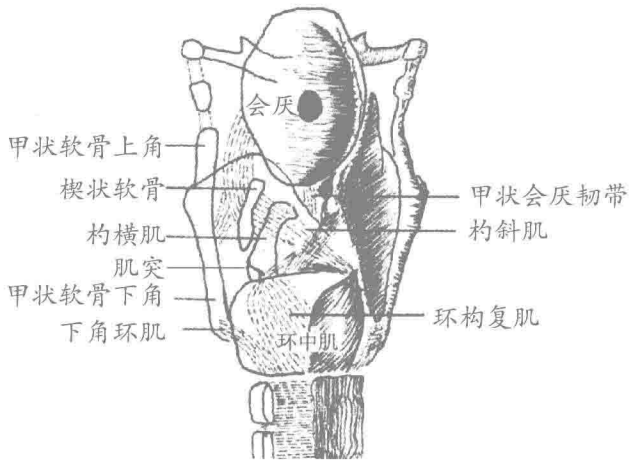


图 14-2 喉部平视图

“声带”(Vocal cords)又名“声襞”(Plica vocalis)、“声唇”(Vocal lips)或“真声带”(True cords)等，是喉中部上下两对前后走向的皱襞中下面的一对。上面的一对为“假声带”(False vocal cord)或名“室带”(Ventricular band)。声带实际并非像带子，只是具有弹性的纤维组织，其长度、宽度和厚度因年龄、性别而异。成年男性一般约23毫米，女性约17毫米。声带本身分为两部分，软骨性部分(附着在声门突上的部分)和韧带性部分。假声带与正常发音无关，在轻声耳语的时候可协助闭合声门。声带之间的空隙称“声门”(Glottis)，吸气时打开，发音时闭上。真假声带之间，喉壁两侧的袋形凹陷为“喉室”(Ventriculus laryngis)，亦称“莫尔加尼氏室”(Ventricle of morgagni)，它的大小取决于嗓音是“开放”还是“掩盖”的。(见图14-3)

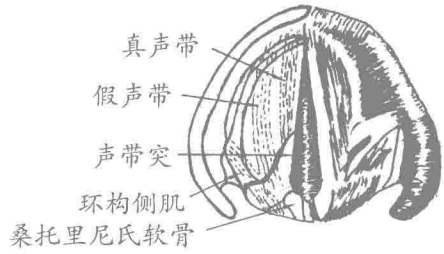


图 14-3　喉部俯视图

前面已经提及，声带可视为一对自由式振动的肉质簧片。在平静地呼吸时，声门打开，声带处于松弛的分离状态，人们得以自由呼吸。歌唱时，喉肌接到大脑的指令而收缩，对称的两片声带被拉紧，气流从两片声带（相当于簧片）中通过，激发声带的振动而发声。随着频率的升高而后端上提、前端下拉，于是喉头的前后径增大，声带被拉紧，拉长，两片声带靠拢。不歌唱时，喉头处于休息状态，声门打开，空气恢复上下自由流通。

图14-4是通过高速摄影机拍摄到的声带关闭（发声）——打开（无声）——关闭的照片。

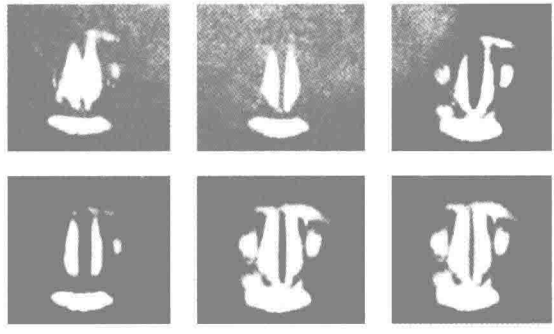


图 14-4　声带工作状态照片

因为声带长在喉部，常人在一般情况下很难看到。为了得到声带工作的真实情况，研究者需要通过特殊的装置来观察它。图14-5是目前常用的一种观察方式：

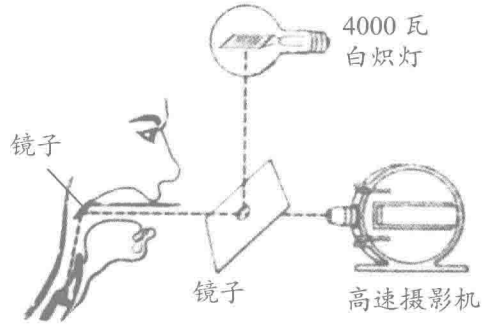


图 14-5　目前常用观察声带工作的方法

声带振动本身发出的是一种很微弱、高频很丰富的声响，只有通过人体中的各种腔体的共鸣才能具有乐音的效果。嗓音的共鸣系统包括咽腔、鼻腔、头腔、口腔和胸腔等一系列的共鸣腔。咽腔是指从口的后部延伸到食管入

口处的这一段管腔，它既属于呼吸道，又属于消化道。呼吸时，空气通过鼻孔（或嘴）经由咽腔、喉头和气管进入肺部。咽腔管道由纵向肌和轮肌控制，可以改变咽腔的长度和宽度。歌唱时，有些人能自然打开这个腔区，有些人则需要经过训练才能打开。由于咽腔能够改变长度和宽度，而且紧接喉头，所以这个腔区成为空气柱振动的重要部位（见图14-6）。

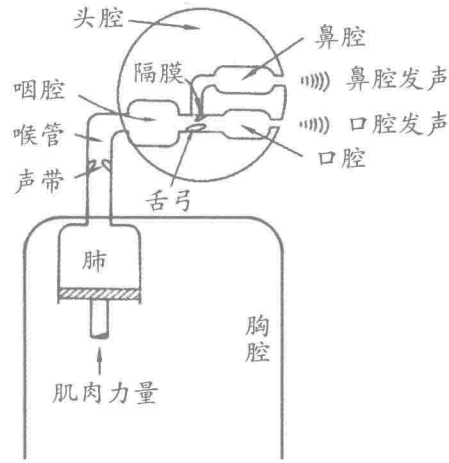


图 14-6　嗓音共鸣腔体示意图

同簧振乐器发声原理一样，声带振动激发了各共鸣腔空气柱的振动，空气柱的振动反过来把声带的基音频率拉低，两者产生声耦合。歌唱者在耦合过程中加强泛音中协和的成份，使音量增大，这就是平时所说的共鸣腔对声音的过滤和放大作用。在改变音高时，声带在改变张度的同时，喉头、口腔和咽腔的容积亦作出相应调整，空气柱的长度和直径亦产生变化，于是又产生新的耦合。

呼吸系统是激发声带振动的动力源，由气管，支气管，左肺，右肺组成。其功能是将由心脏送来的带二氧化碳的血液，经肺泡进行气体交换，变成带氧的血液送回心脏。呼吸既是气体的交换过程，也是发音的能量来源。在吸气和呼气的反复节律性运动中，胸腔的容量作增大和缩小的重复变化。据科学家统计，普通人在平静时，平均每隔4~5秒钟呼吸一次，成年男子常规肺活量大约在3.5~4升之间，女子为3升左右。经过训练的歌唱家，可以增加肺活量，延缓换气时间。

图14-7是男女肺活量比较情况：

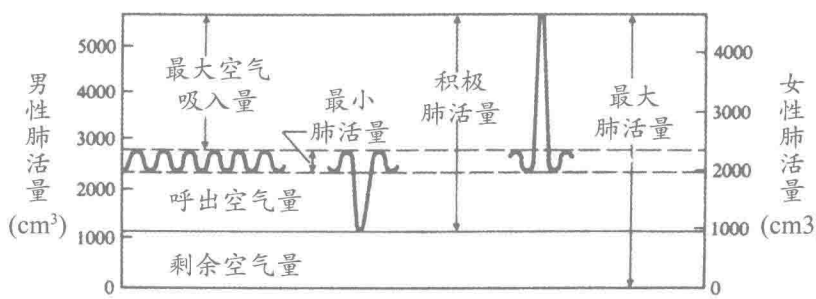


图 14-7　男女肺活量比较

平时，呼和吸是脑神经反射活动，呼吸均匀地循环进行，是下意识的。歌唱时的呼吸，因为发声和音乐表现的需要，常常打乱了平时呼吸的均匀性，而且使肺的活动同胸部、腹部肌肉的活动结合起来，呈现出复杂的控制性活动。所谓科学地歌唱，是指歌唱者能够合理地调整

呼吸，使声带振动并引发各共鸣腔的共鸣，同时毫不费力地同空气柱发生耦合，以共鸣腔带动声带。这种歌唱方式不仅能获得洪亮优美的音响，而且可以节省声带的“做功”，保证歌唱者能持久地歌唱。

人们的嗓音大小是不同的。专门研究歌唱声学的科学家发现，歌唱时的音量大小与声带开口处（声门）的空气压力基本呈线性关系：压力越大，音量越强（见图14-8）。从这个意义上讲，要想让自己的嗓音更加洪亮，关键要增强声门处的压力，这一方面与气体排出的强度有关，同时也与声带的张力和弹性有关，声带张力越大，弹性越强，就能承受更大的气体压力。就像制作乐器要注意挑选好的材料一样，挑选学习歌唱的学生，老师也会特别注意他们的自然条件，最重要的一点就是肺活量和声带的张力和弹性，只有二者具备了优良的条件，才有可能培养出优秀的歌唱家。

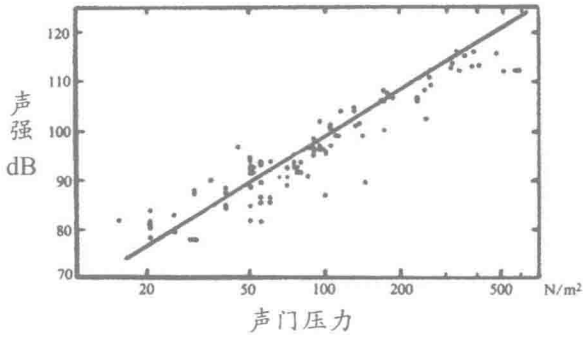


图 14-8　声门压力与歌唱音量关系示意图

嗓音乐器与其它乐器的根本区别，在于它自身是生物体，各个器官具有可感觉性和可塑性。严格地说，除了头腔各窦体外，其它各共鸣腔都可以或多或少地调整其容积。同时，声带振动所引起的各个共鸣腔的共振，各共鸣器官的压觉神经是可以感觉到的。因此，当歌唱时，可以通过这种声波振动的位置感，寻找最佳共鸣位置。

综合各器官的功能，人在歌唱发音时，音高变化主要靠演唱者声带和共鸣腔体的生理构造以及演唱时的位置调节来决定，音量变化主要由演唱者的肺活量及气流喷出的速度决定，音色变化则主要由演唱者对各共鸣腔体的运用来决定。所谓不同流派或唱法，从声学机理上看，主要是对呼吸系统以及各共鸣腔体的控制与运用上存在差异。

第二节　歌唱发声特性

歌唱不同于语言的主要区别，是它的声音本身具有音乐性。音乐美学理论家汉斯立克（E.

Hanslick,1825~1904)对语言与音乐的区别曾有精辟的阐述："语言的音响只是一个符号,或一个手段,它被用来表达跟这个手段完全无关的东西,至于音乐的音响,它本身是一个对象,即它本身作为目的出现着"[1]。从某种程度上讲,汉斯立克的这段话也可以用于描述语言声和歌唱声之间的区别,语言声只是传达思想或情感的音响或手段,而歌唱声本身就是人们所要了解的对象,或者说就是一种目的。

当代一些流行歌手热衷于采用"说唱"的方式来表演,强调歌曲的节奏感,旋律性已经变得越来越不明显[2],但这毕竟不能代表绝大多数歌唱形式。本节所要讨论的歌唱发声特性,依然以大多数人习惯的歌唱形式为对象,即由人声发出的、带有旋律性的乐音为主体。但需要以语言发声作为参照对象,目的是使大家更易于理解歌唱问题中的内容。

一、歌唱声的频谱特性

同大多数物体受激发出的声响一样,嗓音发出的声音,无论语言声还是歌唱声,都是一种复合音,即其中有基音也有很多泛音。音乐声学中常用频谱来描述基音与泛音成分之间的关系(见第七章),下面的频谱就显示了语言声与歌唱声在物理上的一些差异:

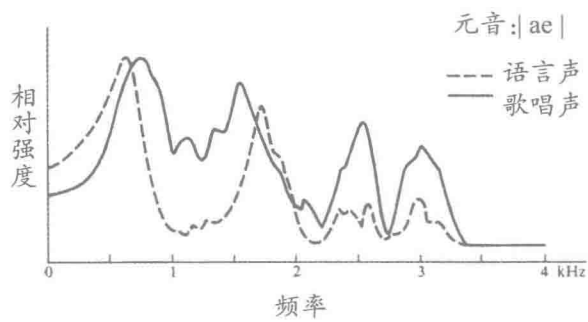


图 14-9 语言声与歌唱声的频谱比较

1. 总体上看,歌唱声的强度曲线要高于语言声,这与共鸣腔体的数量和共鸣方法有关:人们在讲话时,参与共鸣的腔体没有歌唱声多,即使有腔体参与共鸣,其参与形式也没有歌唱声来得积极。

2. 在发同样元音的情况下,歌唱声与语言声在基音的高度上有差异,歌唱声比语言声的频率要高一些。这种差异源于声带基础振动的频率。歌唱时声带的紧张度一般要大于讲话,

[1] 汉斯立克:《论音乐的美——音乐美学的修改新议》,杨业治译,人民音乐出版社1978年版,第57页。

[2] 譬如起源于20世纪70年代的美国黑人流行音乐Rap,自始至终歌手都是在"说"着节奏感非常强烈的歌词,而无任何旋律性。

紧张度的增加往往会对物体振动频率产生影响，二者一般呈正比关系。

3. 歌唱声在高频泛音段（2500赫兹以上）有两个非常明显的泛音成份，音乐声学上称之为“歌手共振峰”（Singer's formant）。这一特征说明，人们在歌唱时有较多的高频共鸣成份在发挥作用。从声学原理角度推测，能够对高频产生共鸣的应当是较小的腔体，譬如说鼻腔或头腔。

二、歌唱声的波动特性

歌唱声不同于语言声的另一特征，就是它的波动性。在音乐上称为“波动音”（Vibrato），又称“吟音”或“颤音”。人在讲话时不会有波动音（除非故意想要一种特殊效果），但是人们在歌唱时，尤其在唱长时值的音符时，为了追求一种变化性，会不由自主地发生波动。有学者认为，歌唱家几乎是不用吟音就无法唱歌。[1]

波动音在声学上可以视为一种频率和声强的周期性的改变。图14-10显示的是一个女声歌手演唱波动音的波形情况。

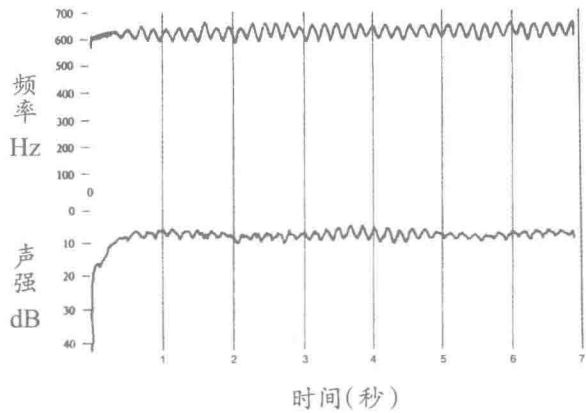


图 14-10　女声波动音的频率和强度变化

图14-10中，上面波形显示的是音高（频率）变化，下面是音量（声强）变化。波动音是围绕600赫兹的高度作上下波动，波动的速率平均每秒钟约为5~6次。由于测量精度不够，在图13~10上无法看出波动时音高变化的幅度范围。通过其他科学家的研究资料可以得知，歌唱家音高波动幅度平均为96音分（十二平均律半音为100音分）[2]。

从图14-10上面的图形中还可以看出，演唱波动音不仅是音高在变化，音量也同时在变

[1]　缪天瑞：《律学》，人民音乐出版社 1996 年版，第 297 页。

[2]　同注释 [1]。

化，其变化速率与音高颇为一致。但音量的波动变化似乎不像音高那么稳定，注意在第3~5秒区间，音量波动幅度较强，而在第5~6秒区间，波动幅度又变得较弱。

波动音可以采取不同的方法来获得。一种是控制喉头、咽腔和鼻腔的肌肉，使这段管腔发生周期性的收缩，于是管长和气流量亦随之作周期变化，产生频率与振幅的声音波动；另一种是控制腹肌和横膈膜，作周期收缩，于是气息流出产生周期变化，产生振幅波动音。还有一种是利用两个不同共鸣腔之间的频率差，产生拍音性波动音，这种波动音较难控制。再有的方法就是上述几种方法混合使用。

三、歌唱的音区和音色变化特性

正常人说话的嗓音频率范围不宽，通常情况下，成人男性最低至80赫兹左右，女性最高至400赫兹左右。就个人来说，平时说话的嗓音音域上下不过六至八个半音，最多也不超过一个八度，但歌唱声的音域变化范围要宽得多。歌唱时，未经训练的音域为一个半八度，训练过的嗓音音域为二个至二个半八度。个别歌唱家的嗓音可以达到三个八度。下面是美声唱法不同声部所用音区的频率：

表 14-1 美声唱法不同声部所用音区的频率

声部	男低	男中	男高	男唱女声	女低	女中	女高	花腔女高
频率（Hz）	72-288	88-352	104-416	128-512	160-640	192-768	240-960	288-1152

宽广的音域也使得歌唱声的音色变化也比语言声要丰富，这主要与共鸣区的运用有关。声乐界一般把歌唱音域按共鸣区的运用分为胸声区、混声区（又称中声区）和头声区。胸声区是指歌唱时以胸腔共鸣为主的音区，音色比较宽厚；混声区是兼用胸腔和头腔共鸣的音区，音色兼有宽厚和明亮，富有弹性；头声区是指以头腔共鸣为主的音区，音色比较明亮。

综上所述可以看出，歌唱声之所以不同于语言声，从声学角度讲主要是在频谱、波动音、音域和音色方面存在着差异，而在音量和节奏变化方面二者并不存在太多的区别。譬如在音量变化方面，人的轻声细语和声嘶力竭的喊叫之间的力度变化并不比歌唱来得小，有时甚至大于歌唱。

第三节 “歌手共振峰”理论

“歌手共振峰”在音乐声学研究中受到一定程度的重视，但对于“歌手共振峰”尚无公认或确切的语言描述。综合有关资料，取其共同点，可以归纳出以下要点：“歌手共振峰”是指出现在2200~3200赫兹频率范围的一种共振波峰，它的存在可以增强歌唱者嗓音的明亮度和

穿透力，不至于被乐队伴奏或其它音响所掩蔽。

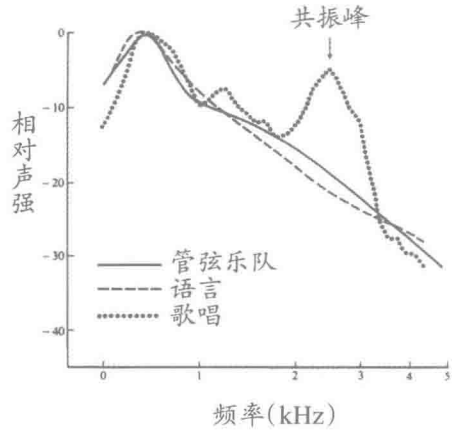


图 14-11　管弦乐队声、语言声和歌唱声频谱包络比较

图14-11是研究人员对混有乐队演奏声、语言声和歌唱声的音响测量结果，由于歌唱声在2800赫兹左右有一个较强的共振峰，因此在所有的声响中听起来十分明显[1]。

美国印第安纳大学的阿佩尔曼(Appelman)教授认为，歌手共振峰并非只有一个而是有三个。根据元音发音的不同，第一个共振峰在300~700赫兹区间内，第二个在640~2200赫兹区间内，第三个在2250~3450赫兹区间内。此外，唱不同的元音。以及男声和女声之间，共振峰的位置也会发生变化。表14-2是对不同元音所作的共振峰数据的统计[2]：

表 14-2　不同元音的共振峰数据

元音			/i/ (ee)	/I/ (i)	/ɛ/ (e)	/æ/ (aa)	/a/ (ah)	/ɔ/ (aw)	/u/ (u)	/u/ (oo)	/^/ (u)	/ɜ/ (er)
共振峰频率(Hz)	F_1	男	300	375	530	620	700	610	400	350	500	400
		女	400	475	550	600	700	625	425	400	550	450
	F_2	男	1950	1810	1500	1490	1200	1000	720	640	1200	1150
		女	2250	2100	1750	1650	1300	1240	900	800	1300	1350
	F_3	男	2750	2500	2500	2250	2600	2600	2500	2550	2675	2500
		女	3300	3450	3250	3000	3250	3250	3375	3250	3250	3050

笔者也曾对美声唱法中的共振峰现象进行过研究，通过频谱分析，发现除元音因素外，音

[1] Sundberg. *The Acoustic of the Singing Voice*. Scientific American. 1977:236.

[2] Appelman. *The Science of vocal Pedagogy*. Indiana University Press, 1967.

区(无论低音区还是高音区)、歌唱力度(无论 *ff* 还是 *pp*)和歌唱方法的变化也都会对共振峰的形态有直接影响[1]。因此,在研究歌手共振峰问题时,首先要确定歌手嗓音的类型和发声时的各种边界条件。通过对两个男声歌手(一个男高音,一个男低音)发声时的频谱分析,我们发现歌唱方法与共振峰有如下关系:

1. 共振峰的高度与歌手发声力度呈正相关关系,即歌唱力度越强,共振峰越高。

2. 共振峰的宽度(共振峰所在频域的区间大小)与元音变化的相关性较强。例如,元音"i"共振峰的宽度就比"a"的要宽一些。

3. 歌手的发声方法正确与否对共振峰密度(指共振峰内各个泛音能量的分布疏密状况)和高度有着重要影响。例如,用"喉结上提"的发声方法得到的共振峰密度比正确发声方法要稀疏一些。对此,本章第五节还会继续讨论。

瑞典歌唱声学专家桑伯格(Sundberg)认为通过一些歌唱技巧可以调整共振峰的位置,从而得到比较好的声音效果。譬如,女高音在歌唱时,口形的变化对共振峰的位置会起到一定作用。当口形较小时,第一个共振峰相对靠前,与泛音列中居前的泛音不在一个位置上,因此声音不够明亮;当口形张大时,会使第一个共振峰位置后移,并与泛音列中的某一泛音重合,这时会产生明亮、有穿透力的歌唱效果[2]。口形变化实际上起到的作用是改变了发声通道的长度和直径:口形小的时候,声道的长度相对增加,管径变细,口形张大的时候,声道长度相对变短,管径变粗。声道变化自然会影响到共振峰的分布。

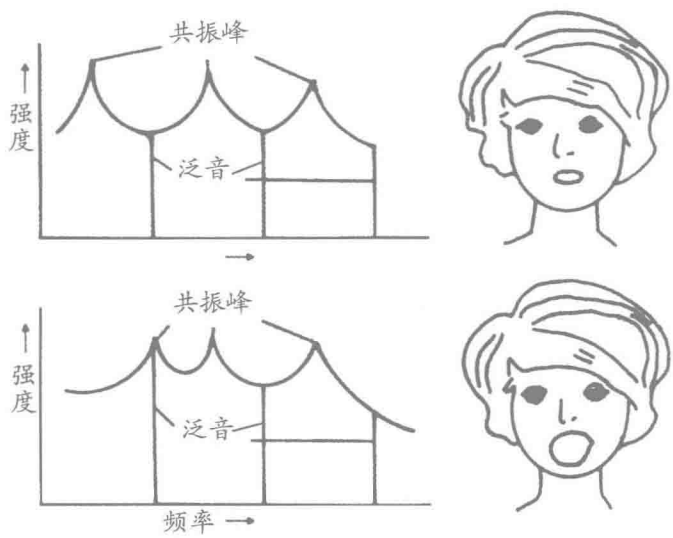
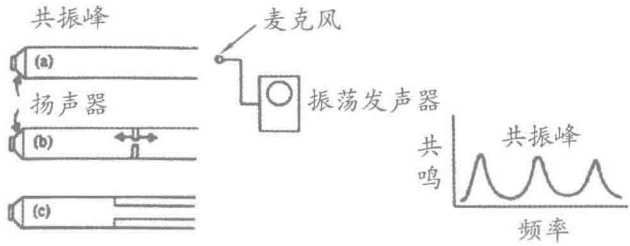


图 14-12 用口形变化调整共振峰位置示意图

[1] 韩宝强等:《中西歌唱发声体系声音形态的比较研究》,《文艺研究》1996 年第 2 期,第 80~91 页。

[2] Sundberg. *The Acoustic of the Singing Voice*. Scientific American, 1977:236.

研究人员一般采用图14-13所示方法来研究声道变化与共振峰的关系：用扬声器发出标准信号声，通过改变管的长度和径度，来测量共振管的变化对共振峰的影响（见图14-13）。



（a）没有附加装置的管；（b）加入可移动的装置改变管的长度；（c）加入可移动的附加内管改变管的内径。

图 14-13　用来演示声道共振峰的实验装置

上述对共振峰的讨论都是基于美声歌唱体系的范畴。虽然“歌手共振峰”是歌唱声学研究的一个重点问题，但到目前为止对中国声乐界的教学和表演并没有产生太多的影响。

第四节　歌唱方法

从古至今，有关歌唱方法的理论可谓汗牛充栋，这些理论的背后代表的是各种各样的歌唱风格与流派。讨论歌唱方法问题势必要提及相关的歌唱风格和流派，这无疑是一个庞大的论题，限于本人知识结构和本书的篇幅，在此仅从音乐声学角度对一些歌唱方法理论加以讨论。

一、唱法问题

所谓“唱法”，就是指歌唱的方法。人类在歌唱之初，肯定无任何方法而言，在当时，只要有人能唱出有音高、音量和时值变化的声音就已经属于艺术性地歌唱。随着人类对自己嗓音驾驭能力的提高，歌唱方法问题就提上了议事日程。

就我国目前的情况而言，从声音特性上看至少存在四种比较有代表性的歌唱方法：美声唱法、戏曲唱法、现代民歌唱法和流行歌曲唱法。需要注意的是，这里是从“声音特性”角度来分类，关注的焦点是各种流派所发出的声音特征，与目前音乐学院或电视台歌手比赛的歌唱分类方法略有不同。

在上述四种唱法中，有关美声唱法的理论建树最多，故在这里多用一些篇幅来介绍。

欧洲早期的歌唱训练，约始于4世纪，教皇圣西尔维斯特（St.Sylvester，314~336）在罗马建立第一所正式的圣咏学校，训练歌手，用以歌唱赞美诗，加强礼拜仪式的庄严气氛。从5世纪起，在宗教仪式和宗教音乐的改革中使用童声来演唱合唱中的高声部，就成为最方便的手段。今日在欧洲某些教堂中尚有沿袭这种传统。至16世纪后半叶，由于多声部歌曲的兴起和

渐趋复杂，对歌手的音乐修养、歌唱技巧以及一定强度的嗓音要求迅速提高，使童声歌手接受更严格和更长时间的训练。当他们达到这种水平时，即使有些男童声仍未变声，他们的演唱期也只有一二年，这就导致使用“假声歌手”和“阉人歌手”以取代童声歌手。

“假声歌手”（Falsetist）和“阉人歌手”（Castrato，意大利文）早在8世纪的近东就开始盛行。摩尔人于8世纪侵入西班牙时，把假声歌唱的艺术带进西班牙，并在那里得到传播和发展。假声歌手可以唱得更高、更优美而灵活，音域较宽，音量较大，因此，很快就弥补了童声歌手的不足。至16世纪，假声歌手主要用来唱女高音声部。帕莱斯特里那的弥撒曲和经文歌大多是为假声歌手和童声歌手而作。阉割的风俗源于一种惩罚，或为服侍内眷的需要；随着阉人歌手的地位提高，尤其是后来他们在歌剧中的突出地位，诱使许多人暗施阉割手术。18世纪，阉人歌手处于顶峰的时代。据说在意大利每年有4000多个男童被阉割。阉割可使男童保持高音，随着孩子的继续成长，他们的嗓音力度也随之增加，经过严格训练后，他们的肺活量和横膈膜的力量都远远超出成年男女。可以说，他们是具有超成年男人体力的女高音或女低音。欧洲教堂中最后一位阉人歌手莫雷斯基（Alessandro Moreschi，1858~1922）于1913年才退休。他在20世纪初录制的唱片是今日了解阉人歌手嗓音的宝贵音响资料。

自18世纪初到19世纪中，美声（Bel Canto，又称“美歌”）歌唱方式开始盛行于意大利，这不仅代表着一种演唱风格，也标志着欧洲歌剧史中的一个时代和一种声乐教学体系。该术语据说是在1858年首次出现。美声唱法以追求流畅而轻松的歌唱为理想和目标。它要求音响圆润，音高上下变化要非常均匀，无明显的声区转换痕迹，具备流畅的连音，正确的音准，明晰的分句法和完美的收束；歌唱中不应喊叫，不带鼻音，不生硬或过分开放；母音纯正，吐字清晰，表情适度，避免一切粗俗或训练不当的痕迹。18世纪后半叶和19世纪初，是美声歌唱的“黄金时代”。男高音在歌坛的地位迅速上升，男低音也崭露头角。由于美声唱法强调呼吸和发声的合理性，突出嗓音的圆润与穿透力，因此至今在世界歌坛占有主导地位。

我国最早论述声乐的著作，可追溯到元燕南芝庵所著的《唱论》。全书共三十一节，不分卷，列举古代音乐名家，乐曲的名目、格调、节奏、曲式结构、品种、内容、宫调声情、流传地区、歌唱方法以及其它有关音乐理论，但因文字简约晦涩，又多当时用语和行话，颇难索解。其实，中国丰富多彩的戏曲演唱艺术中蕴藏着许多颇能代表我们民族特色的歌唱方法，尚待我们的声乐艺术家系统研究和总结归纳。笔者与同事曾经从声音形态角度对京剧嗓音的特点进行过研究，有关情况将在第五节进一步阐述。

现代民歌唱法是由我国一些声乐歌唱家在借鉴美声歌唱方法合理内核的基础上，结合中国语言特征和音乐表达方式而逐渐形成的一种歌唱方法。从声学角度讲，其突出的特点是嗓音中具有较强的歌手共振峰，音色比较圆润、有穿透力。至于这种唱法是否有悖我国传统民歌演唱风格问题，形成“千人一面”的艺术效果，则已超出本书的主题，应由音乐评论家们加

以评说。

关于流行歌曲的唱法，其声音在20世纪20年代与传统唱法并没有明显的区别，主要区别是体现在音量和音域方面，流行歌手的音量较小，音域较窄。由于20年代的电声技术的发展，流行歌手的发声方法产生了很大变化，其声音已经与“电”融为一体，加上流行歌手比较注重歌词的表达而不太注意嗓音色彩的变化，因此，人们很难找到一种能够代表流行歌曲唱法的声音特征，或者说这种现象本身就是特征：即一种具有多元化、平民化的嗓音特征。

二、换声区问题

歌唱时按照音阶顺次从低音向高音达到一定高度时，初学者常会发现必须换一种唱法才能继续唱上去；由高音向低音歌唱时也会出现类似现象，但不太明显。这就是嗓音中的“换声区”现象，也就是声乐界俗称的“坎儿”，或意大利人所说的“桥”（Ponticello）。如何过“桥”是嗓音训练中最重要和最困难的课题之一。

换声区的学说可分为三大类。第一种学说认为嗓音自低向高或自高向低，只有一个声区；这是一种理想的嗓音状态，但不符合嗓音的实际情况。还有认为每个音都自成一个声区，能唱多少音就有多少声区的学说，也属此类学说。第二种学说认为有三个声区，即认为在嗓音的全音域中存在着三种明显不同的状态，分别称为“头声”（又称“假声”）、“混声”（又称“中声”）和“胸声”（又称“真声”）。第三种学说认为有两个声区，即“头声”和“胸声”。持这种学说的英国声乐教育家斯坦利（Douglas Stanley），在《你的嗓音》（*Your Voice*）一书中称：“由于在喉中有两组肌肉，所以有两个、也只有两个声区。”[1] 他还认为每个声区应有两个八度的音域，而这两个八度中有一个八度是重叠的，所以每个训练有素的嗓音应有三个八度的音域。虽然头声、胸声、假声、真声这些术语已流传多年，但由于这些术语只是一些比喻性说法，表达的是歌手主观感觉而不是嗓音系统工作的真实情况，所以对不同年代、不同的声乐教育权威来说，这些术语具有不同的含义。甚至可以说至今对这些术语的理解和使用依然处于混乱之中。

也有人用肌肉活动上的“重机制”（Heavy mechanism）和“轻机制”（Light mechanism）理论来解释换声区问题：声区变化问题的实质是由于喉内肌对声带的控制，而不在于歌者自身的振感或其它原因。从生理上讲，换声区问题是由两组喉内肌，即环甲肌和甲杓肌的拉紧和放松所造成。环甲肌的收缩促使甲状软骨前摆，使声带拉长变薄，易于发出高音，这就是“轻机制”，与“头声区”理论相对应；甲杓肌的收缩使声带缩短变厚，易于发出低音，这就是“重

[1] 缪天瑞编：《音乐百科词典》“嗓音的声区”词条，人民音乐出版社 1998 年版。

机制”，与“胸声区”理论相对应[1]（见图14-14）。当声带处于“重机制”工作状态下时，发出的声音有力、宽厚，但沉重；当“轻机制”占绝对优势时，声音柔美、但较虚弱。当甲杓肌与环甲肌的功能处于相对独立的状态时，如果歌手试图从一种功能“过渡”到另一种功能时，就会出现“换声点”的问题。要达到换声平稳技术的要点之一，就在于在发声的过程中使这两对肌肉处于相对平衡的状态而不使一种肌肉占有绝对优势。

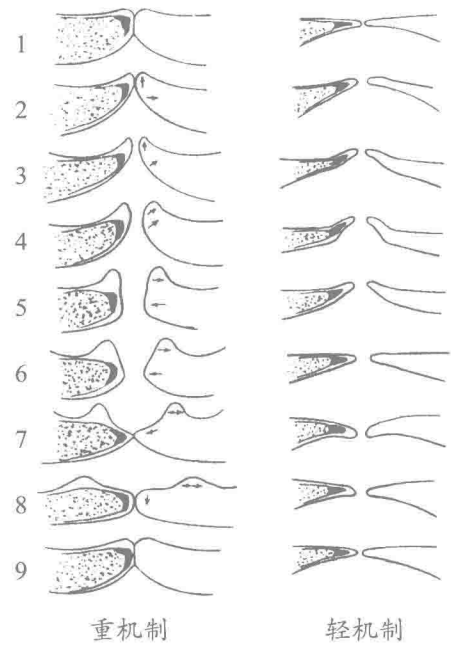


图 14-14 声带在不同机制下的闭合过程（侧视图）

图14-15显示了声带在不同声区时的张力（延长度）以及声门处的空气压力情况：假声时声带张力最大，空气压力也最大；胸声则相反，混声区居中。

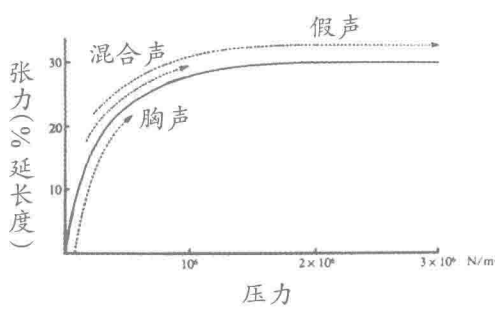


图 14-15 不同声区声带的张力和用气情况

[1] W. Vennard. *Singing: The Mechanism and the Technic*. New York: Carl Fischer,1967.

三、呼吸方法问题

声乐艺术界人士普遍认为：呼吸是影响歌唱质量的首要因素。歌唱的呼吸方法可概括为胸式呼吸和腹式呼吸两种。“胸式呼吸”(Costal breathing)又名“肋式呼吸”(Rib breathing)或“横式呼吸”(Lateral breathing)，这种呼吸的特点主要是两肋的侧向扩张，所谓“气息控制”，即在呼气时尽量保持这种扩张状态。胸式呼吸的缺点在于它排除了吸气肌的对抗运动，从而无法建立吸气肌和呼气肌之间在张力上的有效平衡。位置更高的锁骨式或肩式呼吸是一种“疲惫式”呼吸，作这种呼吸时两肩和胸部明显起伏，控制气息的能力不高，还有可能因涉及的肌肉紧连颈肌而影响良好的发声。

“腹式呼吸”(Abdominal breathing)又称“肚式呼吸”，1855年由曼德尔(L.Mandl，1812~1881)提出，这是一种通过横膈膜和腹肌交替收缩和放松进行呼吸运动的方法。这种呼吸方法存在两种不同的概念：

其一是由横膈膜收缩变平，胸廓底部下降，使胸廓扩大而把气吸入；这时腹脏将下移，迫使腹壁外凸。当腹壁内收时脏器上移，横膈膜复位，把气呼出。在呼气过程中作为吸气肌的横膈膜的收缩或拉紧，与呼气肌的腹肌形成一种对抗或稳定作用，从而稳定嗓音。这种呼吸的气量较饱满，但由于所涉及的部位较低，不适合演唱快速的段落。赞成这种呼吸方法的人更多着眼于呼吸的力量。

其二是通过向内、向上收缩腹肌以迫使游离肋骨向两侧扩张，从而扩大胸廓。腹肌的这种向内、向上的动作涉及复杂的下腹肌、腹外肌、背肌、肋间肌和横膈膜之间的协调。这种呼吸方法既可取得较大的气量，又可取得呼气肌和吸气肌之间的相对平衡，所以被认为是最可取的呼吸方法。由于这种呼吸方法涉及腹肌和胸肌，所以又名“胸腹式呼吸”(Rib and abdominal breathing)。此外，由于横膈膜没有神经末梢，不受意志的控制、也无感觉，所以声乐教师常说的“控制你的横膈膜”只是一种通俗的比喻性说法，因为没有人能控制自己的横膈膜。

四、特殊发声方法

嗓音乐器有时可以运用特殊技巧，在歌唱的同时还吹奏某一件乐器，产生多声部重奏的特殊效果。因为气息的喷出，在激发边棱音、双唇、簧片振动的同时，并不影响激发声带振动。这种特殊的音响结合，从声学的角度讲，属于声波的迭加。在这个过程中，嗓音通过另一空气柱(管乐器)而再耦合，出现了十分复杂的声波合成现象。两个波在相位一致时产生共振，高次泛音互相补充，音色互相靠拢，效果独特。我国民间乐器演奏中就有这样演奏的例子，例如管子演奏者在吹奏的同时哼唱，发出一种类似喉声的合成音；唢呐“卡戏”(用乐器模仿人说话或演唱)演奏的同时嗓音发声，使模仿惟妙惟肖。

作曲家奥斯汀1965年在他的长号作品《变革》中，要求演奏者用吹奏加哼唱的方法发出

一个大三和弦的音响。**恰尔兹**1966年所作的《长号与钢琴》中，用嗓音与长号哼唱一个同音；文字注明：长号吹奏“升F”音时，加上同度的哼唱从元音“u”逐渐变为“i”音。当元音变成“i”音时，音色发生惊人的变化[1]。**克兰纳克**1967年在《五首长号与钢琴》中写道，嗓音在长号上面哼唱不协和音程的乐句，特别是最后的减八度音程，会发出很明显的拍音效果。

第五节 中西唱法的声音特征

1993~1995年间，笔者曾与项阳、林秀娣等研究员一起对中西歌唱发声体系的声音形态进行过研究，主要是利用频谱分析手段对两种唱法的声音特点进行比较研究，以期发现中西歌唱发声体系在声音形态、演唱方法、审美观念、表现手法等诸方面之异同。研究的基本内容包括：

1. 京剧的声音形态研究；
2. 美声唱法的声音形态研究；
3. 美声与京剧声音形态的比较研究。

课题组专门聘请国内一些声乐界和京剧界知名歌唱艺术家作为嗓音示范专家，从而保证声音样本所具有的权威性和典型性[2]。采用的方法，是对两种唱法的各种发声状态进行声学采样，然后进行频谱、声强以及共振峰等方面的测定和数值比较分析，从中找出二者在声音形态方面的差异。

在研究的技术路线上，注重对声音本身进行可视性研究，即通过仪器将所要研究的对象由声音转换为可见和可测量的图形信号，在此基础上再通过比较和统计分析，找出规律。

一、京剧发声的声音形态

京剧是中国的“国剧”，经过两百多年的发展，已成为一种完整且复杂的艺术体系，其发声方法自成一家，嗓音类型因行当不同而异。从听觉角度讲，“老生”的嗓音高亢、苍劲、洪亮而沉着，“小生”的嗓音较为迂缓纤细；“净”的嗓音则比较粗犷、浑厚而响亮。

在我们的研究之前，曾有瑞典声学家**桑伯格**(Sundberg)和美国哈佛大学的**王士谦**先生就中国京剧演员的嗓音中存在不存在“歌手共振峰”问题进行过讨论[3]。由于二者所用的声音样

[1] 梁广程：《乐声的奥秘》人民音乐出版社1986年版，第114页。

[2] 聘请的京剧艺术家包括：马名骏、王文祉(净)、耿其昌、何威(老生)、赵寿延(小生)，李维康、陈琪(青衣)、李鸣岩(老旦)8人；美声歌唱艺术家包括：杜吉刚、黄越峰(男高音)、黎信昌、周天旭(男中音)、雷克庸、刘庆德(男低音)、幺红、黄静(女高音)、李迢迢(女中音)9人。

[3] 王士谦：《嗓音机制和歌手共振峰——兼答Sundberg》，《音乐艺术》1993年第1期，第66~73页。

本不同，研究问题的着眼点各异，故而得出不同的结论是很自然的，但是他们的研究工作还是为我们提供了有意义的借鉴，促使我们对京剧嗓音中的共振峰问题进行了更为全面、系统的分析研究。

在采样内容上，根据京剧专家意见，采集了“喊嗓”（京剧嗓音基本功训练）、“引子”（道白与唱腔相结合）和“倒板”（节奏自由的演唱）的发声。为保证演员的发声符合各个行当的发声规范，在演员演唱时均有京剧界专家作艺术监督。在挑选作频谱分析所用的声音样本时，已经考虑了演员之间辙韵和音区的可比性。

通过对京剧三个男声行当——“老生”“小生”和“净”（花脸）100个声音样本的频谱分析，我们得到如下结果：

1. 三个男声行当在唱相同的辙韵时，共振峰形态各异。概括讲，“净”和“老生”的共振峰在强度上大于“小生”的共振峰；从频域角度讲，“净”的共振峰相对靠前，这可能与演唱者共鸣位置有关，因为与另外两个行当相比，“净”的演唱多使用胸与头腔混合式共鸣（见图14-16）。

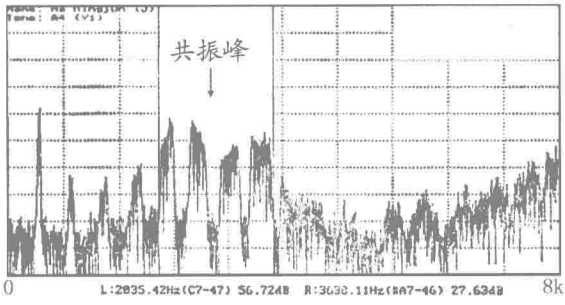


图 14-16　京剧发声频谱

行当：“净”　辙韵：“一七”

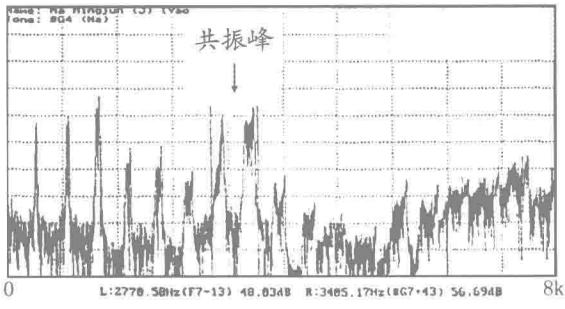


图 14-17　京剧发声频谱

行当：“净”　辙韵：“发花”

2. 三个行当嗓音中的共振峰形态，随唱词辙韵的改变有较大变化。以“发花辙”（元音 a）和“一七辙”（元音 i）为例：“发花”比“一七”辙的共振峰在频域上普遍要窄一些，这与美声唱法有相似之处。

3. 在所有辙韵中，演员唱带有韵母 ang、ong 和 ai 的唱词时，共振峰相对较强，这可能与演唱者在演唱这些韵母的舌位相对较高有关。

4. 唱不同辙韵对频谱中的基音与第1、2泛音在强度上的比例关系也有影响，以“发花”和“一七辙”为例前者第1、2泛音都强于基音，而后者则相反。

二、美声唱法中正确与错误发声的声音形态

传统的美声唱法教学中，由于声乐流派的不同和教法上的差异，对同一声音概念的表述，不同教师可能会有不同的解释。有些常用术语，如“高位置”“打开”“气息浅”“位置不到”“喉结上提”“喉结下压”等，相对说来是比较抽象，因此对声乐学习构成一定障碍。

为此，我们力图用技术手段对声乐教学上的多种发声状态予以展示，比较其异同，为声乐教学提供一种可视性的思路。研究工作首先从声音采样开始，按声部划分为男高、男中、男低、女高、女中共五组。采样内容具体为：首先按常规的美声唱法在高、中、低三个声区唱出五个元音 a、e、i、o、u；然后再用五种不正确的发声方式发声，包括位置不到、气息浅、有鼻音、喉结上提和喉结下压。由声乐顾问对正确和错误的发声状态进行鉴定，看其是否达到了要求[1]。

通过对900个声音样本的频谱分析，得出以下结果：

1. 正确发声的共振峰形态特征。正确发声的共振峰形态，与元音有很大关系，这一点在高、中、低三个声区上表现得都非常明显：a、o、u 三个元音的“峰宽”（共振峰的宽度）基本一致，而 e、i 两个元音的峰宽比较接近，后者的峰宽相对较宽。

就共振峰的高度而言，a、e、i、o 基本相同，而 u 则略低；就基音与共振峰的距离来看，e、i 距离最近，a、o 居中，而 u 相距最远。

除共振峰外，正确发声的第1泛音（高八度）的能量强于基音，而第2泛音（复五度）不及第1泛音的能量。

图14-18至14-22是黎信昌教授正确发声的五个元音频谱图[2]：

[1] 顾问由中央音乐学院声乐系黎信昌教授和中央歌剧院一级演员雷克庸先生担任。

[2] 具体数据详见附录《男中音不同声区正确发声共振峰数据》。

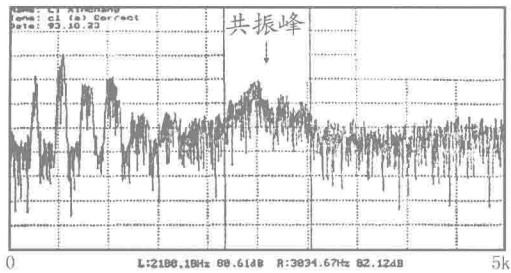


图 14-18　美声发声频谱

声部：男中音　元音：a　发声类型：正确发声

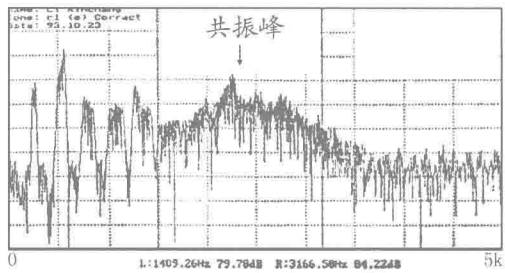


图 14-19　美声发声频谱

声部：男中音　元音：e　发声类型：正确发声

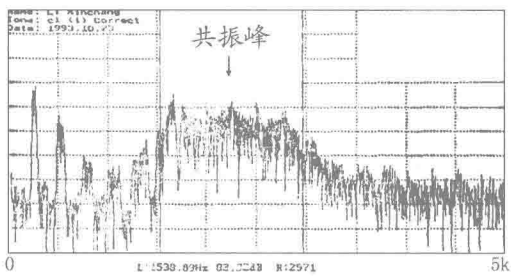


图 14-20　美声发声频谱

声部：男中音　元音：i　发声类型：正确发声

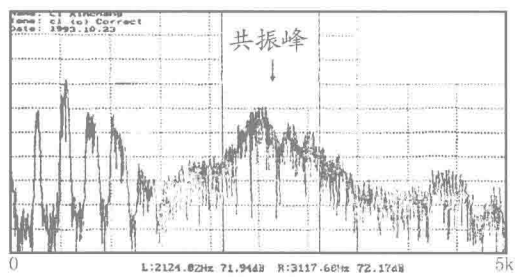


图 14-21　美声发声频谱

声部：男中音　元音：o　发声类型：正确发声

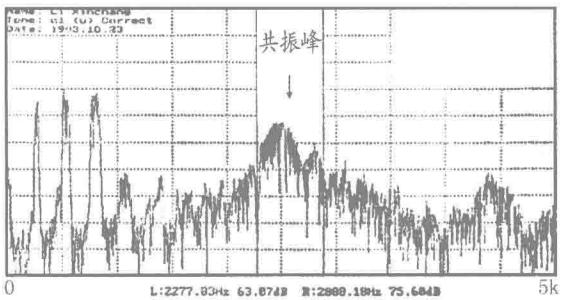


图 14-22　美声发声频谱

声部：男中音　元音：u　发声类型：正确发声

从频谱上看，在中、低声区正确发声时，共振峰比较密集；而在高声区，共振峰虽然也比较密集，但不如中、低声区均匀。这显示出身体的各部位参与共鸣的变化：在中、低声区，胸腔共鸣用得多些，声音较厚实圆润，其共振峰也密集均匀；高声区更多运用头腔共鸣，共振峰形态有如一座座悬崖峭壁，这似乎表现出头部一些参与共鸣窦体的不一致性。由于实验技术的局限，我们尚无法分析出窦体与共振峰之间的对应关系。

2. 错误发声的共振峰形态特征。气息浅唱法的共振峰形态与正确唱法相比，主要差异是在基音的分贝数基本一致的情况下，共振峰普遍偏低。

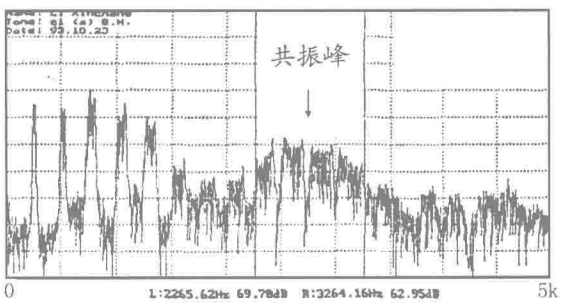


图 14-23

声部：男中音　元音：a　发声类型：气息浅　频谱特征：共振峰偏低

喉结上提唱法的形态比气息浅唱法更为明显。五个元音共振峰的包络与正确唱法明显不同，如果说元音 i 尚能看出共振峰的影子，那么其余几个元音的共振峰几乎看不见。所以这种发声方法在声音的穿透力方面肯定处于劣势。

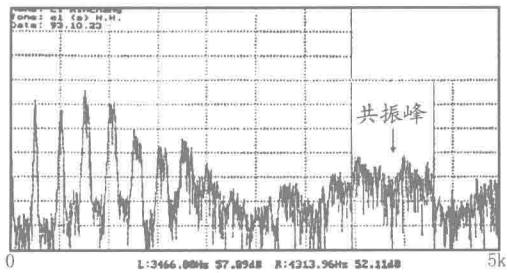


图 14-24

声部：男中音　元音：a　发声类型：喉结上提　频谱特征：共振峰偏低，频域后移

喉结下压唱法，低声区的共振峰图形与正确发声几乎没有差异，只是第2、3泛音之间有其它能量存在，一定程度上会影响声音清晰度，但总体上看喉结下压唱法对共振峰没有明显的影响。

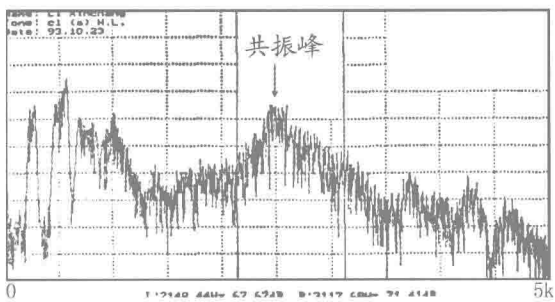


图 14-25

声部：男中音　元音：a　发声类型：喉结下压　频谱特征：共振峰与正确唱法基本相同

鼻音唱法的共振峰与正确唱法相比，除峰高偏低外，峰的顶部有凹陷，表明有些窦体的共鸣受到阻碍。

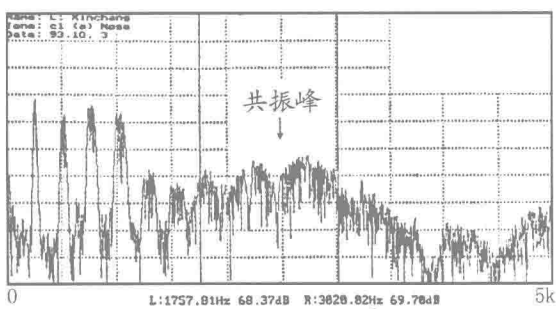


图 14-26

声部：男中音　元音：a　发声类型：鼻音　频谱特征：共振峰偏低，峰顶有凹陷

位置不到唱法，意味着声音更多在口腔，而头腔共鸣较少，换言之，则是头腔共鸣没有得到很好的利用，这从共振峰上可以得到明显的显示，即共振峰普遍偏低，且峰顶有凹陷。即便在中、低声区亦如此。

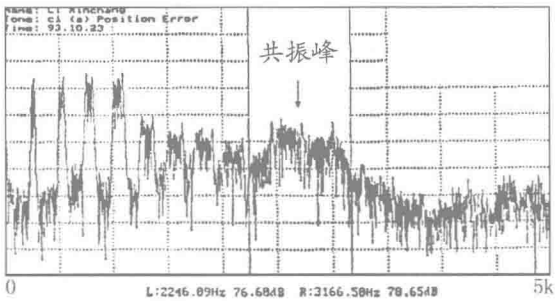


图 14-27

声部：男中音　元音：a　发声类型：位置不到位　频谱特征：共振峰偏低，峰顶有凹陷

总体来看，错误发声状态的频谱特征主要体现在共振峰普遍偏低，峰形不规则，中低声区共振峰的疏密度比较稀疏。

3. 不同声部的共振峰比较。总体上分析，男声不同声部上显示出的共性成分较多。而男、女声之间的差异更为明显。女声在低声区表现出与男声共振峰有较多的相似，而中声区的共振峰与男声高声区的特点比较接近，即共振峰是由一些密集排列的泛音组成，这显示出男女声生理上的差异。

三、美声与京剧声音形态的比较

在分析了京剧男声三种行当（京剧女声的情况由于采样数量有限，目前尚无法做出具有统计学意义的分析）以及美声五个声部的声音形态之后，我们取得以下主要结果：

1. 京剧男声演员的嗓音中存在“歌手共振峰”，这一点与美声有共同之处。

2. 京剧发声的共振峰随唱词辙韵的改变而变，美声亦随元音变化而变，此为二者的共同点。

3. 京剧三个男声行当中，净和老生的嗓音中具有较突出的歌手共振峰，小生嗓音中的歌手共振峰较弱。美声不同声部之间共振峰的强度变化不大。

4. 净的共振峰一般在2500~3500 赫兹范围，与美声歌唱演员的歌手共振峰形态相近；老生和小生共振峰的峰域相对靠后，一般在3000~4000 赫兹区间范围，与美声有较大差异。

通过美声唱法与京剧发声的共振峰频谱的比较，我们认识到了两者之间的异同。因为两种发声方法分属于两种不同歌唱体系，其发声训练方法与审美意识都不一样。因此，不能从哪种方法更科学的角度对两种发声体系加以评判。很明显，如果说在美声唱法中，可以用共

振峰的形态来判断其歌唱方法的正确与否，那么用它来衡量京剧发声方法的好坏显然是不合适的。为此，我们认为下面两项工作对我国民族声乐理论的研究非常重要。

1. 已有的“歌手共振峰”定义源自美声唱法，今后应当从民族音乐学角度，对嗓音类型加以分类，并对“歌手共振峰”的定义进行适当修改，使之适用于美声唱法以外的各种发声体系。

2. 各种发声体系均与特定的文化传统和人文环境有关，体现了其听赏者的审美观，若从音乐声学角度来描述世界上风格各异的发声体系，仅用“歌手共振峰”一个参量是远远不够的。因此，发现更多的客观描述语言，应当成为我们今后研究的一个重点。

章后思考与讨论题

1. 从乐器声学构成角度看，声带和口腔分属哪两个声学系统？
2. 声带的振动类似于“自由簧”吗？
3. 从音乐声学角度分析，获得“歌手共振峰”都需要哪些条件？
4. “歌手共振峰”理论适用于中国民族歌唱艺术吗？
5. 你自己能否用音乐声学测量方法检测自己歌唱时有没有“歌手共振峰”？
6. 从音乐声学分析角度看，语言声与歌唱声之间存在哪些明显差异？
7. 从音乐声学角度分析，要想获得比较洪亮的嗓音需要具备哪些条件？

第十五章　空间音乐声学

第一节　空间音乐声学研究的问题

人们常说，音乐是时间的艺术。其实，音乐也是空间的艺术，因为人们在不同的空间会有不同的音乐感受。为什么高亢嘹亮的山歌总是发于广袤山林，而轻柔婉转的小调常常出自瓦肆勾栏？我们的音乐史学家习惯于将这种现象与社会文化联系在一起。其实，在这种现象的背后，还有一种声学上的客观规律使然，这就是“音”在不同空间所展示出的异样色彩。

我们已经习惯在特定的环境中聆听特定的音乐，例如优雅的江南丝竹适合在小型的合奏厅来欣赏，而激越的军乐队总是在开阔的空间进行演奏。如果将二者的演奏空间互换，其音响效果必然大相径庭，在合奏厅演奏军乐势必会震耳欲聋，而在广阔空间欣赏江南丝竹则可能会“只见其影不闻其声”。这些例子说明，任何乐器的演奏效果都与空间环境紧密联系在一起，不了解空间环境的声学特点，就无法全面把握乐器（包括人声）的音响性能。因此，在了解乐器声学知识之后，读者还要知道一些与乐器声学关系极为密切的空间声学知识。

需要说明一点：人们常常把有关环境声学的知识称为“室内声学”（Room Acoustics）、“厅堂声学”（Hall Acoustics）或“建筑声学”（Architecture Acoustics）。笔者认为，上述名词都不足以涵盖空间环境与音乐声的关系，因为音乐除了在室内或音乐厅里演奏外，也会在完全开放的广场、半开放的体育场和各种不同类型的封闭空间（如小型多功能厅和录音棚）演奏，还有更多的人则是利用家庭环境来欣赏音乐 CD，观看具有多声道音响效果的 DVD 节目。这些问题也不能排除在音乐声学研究的范围之外，故笔者创用“空间音乐声学”（Musical Acoustics of Space）一词，目的是使读者从环境的多样性角度来理解空间对音乐声的影响。

1. 空间音乐声学主要研究那些问题呢？归纳国内外研究情况，空间音乐声学主要关注下列问题：

（1）不同空间声响的基本组成及其建立问题，主要包括直达声、各种形式反射声和混响声的特性，以及声的衰减、不同空间声场分布问题等。

（2）影响室内声场的因素分析，包括房间的大小、形状，声源位置和强度，吸声，室外、室内噪声和隔声等。

（3）不同声场环境与最佳音乐音响效果的关系，主要研究各种音乐表演形式（如管弦乐、军乐、室内乐、独奏、协奏、独唱、合唱等）和不同音乐风格对声场条件的需求。

（4）不同空间声场的研究方法和手段，包括分析法、统计（能量）法、几何（声线）法、计算机模拟法等。

（5）不同用途音乐空间的特点及其设计上的要求，如音乐广场、音乐厅、歌剧院、录音棚和小型家庭听音环境等。

（6）与空间声场环境有关的建筑、装饰材料的吸声特性、施工技术的研究。

（7）对应于不同空间声场物理量的主观听感心理量研究，如响度、音色、空间感、清晰度、可懂度的测量等。

（8）人工模拟空间声场环境的方法和技术，如各种典型声场效果的测量分析与数字模拟、杜比环绕声的概念与系统设计等。

2. 现代音乐空间环境的设计原则是以追求最佳音乐音响效果为中心。虽然不同用途的音乐厅堂有不同的室内声场指标，但有一些要求是共同的，包括：

（1）各处的响度要比较均匀、清晰。既不能存在“焦点”也不能有“盲点”，即不能让有些地方的声音听起来比其它地方响，或比其它地方弱。

（2）能够弥补自然声场的缺陷和不足，即在厅堂先天音响条件不佳的情况下能够改变音响效果，控制声场分布，以达到声场均匀、改善听感的目的。

（3）能够营造出特定的声场，并可以随意调控。通常情况下是通过电子控制的方法来实现这种目标；对于各频段的声音都有较均衡的，或按要求优化的反射，不使某些频率的声音过于突出，即出现所谓声音“染色”现象；尽量减少环境噪声，使听众能听清低音量的声响和细微的变化。

3. 音乐声学工作者在评价音乐厅的音响效果时需要使用规范的术语。美国建筑声学专家**白瑞纳克**（Beranek）于1962年提出使用18种术语对音乐厅的声音效果进行评价，以下是其中较为重要的10种[1]：

（1）亲近感。好像在一间小房间里面听音乐的演奏，直达声与第一反射声之间小于20毫秒。

（2）生动感。主要取决于房间对中高频的混响时间，如果混响时间不够，音乐就会显得比较“干”。

（3）温暖感。主要取决于生动感和丰满的低音。对于250赫兹以下频段，其混响时间应长于中高频段。

（4）直达声强度。主要取决于音乐厅的大小。一般来说，音乐厅的空间不能太大，否则就不可能有足够的直达声。

---

[1] Beranek. *Music, Acoustics and Architecture*. New York: Wiley Publish House, 1962:88.

(5)混响声强度。主要取决于混响的时间和声源的强度。

(6)清晰度。主要取决于直达声的强度,一般总要强于反射声。

(7)均匀度。主要取决于声场中是否有足够的散射,是否存在声聚焦或声阴影。

(8)平衡感。主要取决于舞台设计。如果舞台宽于15米,舞台天花板高度应控制在10米以下,并采用不规则角度。

(9)利于合奏。让演奏员相互间能够听到对方演奏的声音,以利于默契配合。

(10)低噪音。环境噪声应小于20分贝。

第二节　空间音乐声学的基本概念

欲把握空间与音乐的关系,首先应认识一些最基本的空间音乐声学概念。

一、直达声

直达声是指从声源发出的直接到达接收者的声音。对听音乐来说,直达声是非常重要的一种声波,对声源的定位起着至关重要的作用。譬如,在音乐厅聆听交响乐的时候,如果你所在的位置直达声能量不充分的话,就无法正确判断正在演奏的乐器声是从哪里发出。

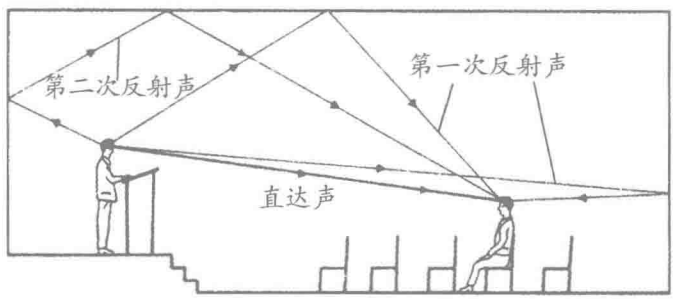


图 15-1　直达声和反射声示意图

二、反射声

反射声是指声波遇到刚性界面反射而至的声音。反射声对人们的环境感觉极为重要。如果只有直达声没有反射声,人们会感觉身处一个开阔的平原。如果反射声强烈,则会感觉处于一个狭小的空间内。音乐声学研究中关注的是各种各样反射声的存在,特别是50毫秒内的早期反射声。1851年出现的哈斯效应(Haas Effect)理论指出:早期反射声对于音乐的响度、明晰度、丰满度、明亮感等都有影响。对早期反射声的进一步的研究又表明,早期反射声中的侧向反射声对主观听感有很大影响。它的时间分布影响空间感和音色。侧向声的低频成分强、空间感好,而侧向声的高、低频成分之比则会影响音色。对于一个完全开放的空间来说,理论

上只有直达声，没有反射声。

三、散射声

散射声是指声波遇到不规则形状反射物后扩散产生的声音。为了使音乐厅内各处的声能密度分布均匀，声波应当向所有方向传播。为了达到良好的扩散效果，一般要在声场内安置不同类型的扩散体。扩散体主要对低频段及中频段声音产生作用。任何扩散体的扩散效果都与它本身尺寸以及声波的波长有关。如果扩散体的尺寸小于波长时，则无扩散效果；如果扩散体尺寸与波长相当时，声波会产生散射和无规则反射；如果扩散体的尺寸远大于声波波长时，则声波按扩散体的表面形状产生反射，将声音扩散。常用的扩散体的形状有半圆柱、波纹体、蜂窝体和三角锥体等。

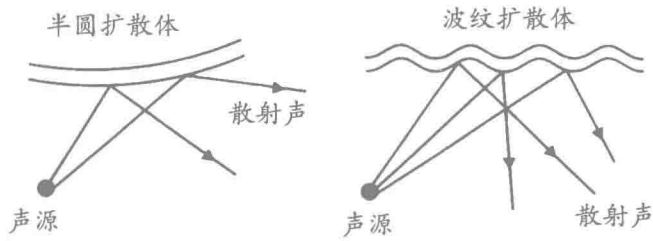


图 15-2 扩散体示意图

四、混响声

混响声是指从各个方向来的，以相同的概率到达每点的多次反射声。如果混响声中反射波很密集，混响声延续时间会较长。较大空间有利于获得好的低音效果。各简正频率的间隔与空间的长、宽、高有关。音乐空间的基本设计要求是三者之比是无理数为好，不要整数，主要是避免产生声音“染色”，即对某个频率段的声音反射过强。科学家经常推荐的音乐空间的长宽高比例是：1.618:1:0.618（又称“黄金分割比例”）或$1:\sqrt{2}:\sqrt[3]{2}$（根式比例）。总之，只要有可能，就应采用多边不规则的空间设计。

五、混响时间

混响时间是指当声源停止发声后声场中的声强衰减60分贝所需要的时间，记作 T_{60}[1]。美国建筑声学专家赛宾（Sabine）在1900年提出了计算混响时间的公式：

$$T_{60}=\frac{KV}{as}$$

公式中，V 是闭室容积，a 是材料平均吸声系数，S 是房间的总表面积，K 是一个与温度

[1] 衰减 60 分贝就是能量变为初始的 $1/10^6$，即百万分之一。

有关的量，常温下 K≈0.163s/m。混响时间是空间音乐声学中非常重要的一个指标。

录音棚或听音室的混响时间要短些，音乐厅的混响时间可以长些。音乐厅的混响时间一般接近或超过2秒。如美国波士顿音乐厅的中频混响时间为1.82秒，日本大阪“交响乐”音乐厅的中频混响时间为2秒，我国北京音乐厅的中频混响时间为1.4秒。

六、声场均匀度

声场均匀度是指声场各个角落的声音强度是否均匀。良好的听音环境设计可以保证听众无论坐在哪里，所听到的音乐效果都一样，而设计低劣的音乐厅，听众哪怕转一转脑袋，声音效果都有可能发生变化。其主要原因，就是环境中的声场分布不均匀，有声音聚焦的地方，听起来声音比较大，而声波稀疏的地方，听起来就比较弱。解决的方法之一是在声场中加装扩散体，以增加声波的散射。

七、吸声系数

吸声系数是各种材料吸声能力大小的量，通常用字母 *a* 来表示。当声波遇到材料表面时，被吸收的那部分声能（E_a）与入射声能（E_i）之比的百分数，就称为“吸声系数”。其表达公式为：

$$a=\frac{Ea}{Ei}\times 100\%$$

由上式可以看出，吸声系数 *a* 的值在0~1.0之间，数值越大表示吸声效果越好。

八、吸声材料

吸声材料是指具有吸声效果的材料。各种材料都有其自身的吸声系数。一般常用吸声材料的吸声系数都是在标准实验室用特定的方法测量而得。常用的吸声材料有超细玻璃棉毡、矿岩毡、岩棉、穿孔石膏板等。每种材料的吸声系数与声音的频率有关，即使同一种材料，对于高、中、低不同音区声音的吸纳能力也是不同的。有的材料对高频声音有效，但对低频收效甚微，选择吸声材料时必须注意这个问题。

人和家具也是吸声体。房间内的桌、椅、柜和被服等都具有一定的吸声能力，它们有的是多孔性吸声材料，有的属薄板吸声结构。人的穿着不同，吸声能力也随之不同。人和家具不易计算面积，因此，大多以每个人或每件家具的吸声量来表示。

在处理剧院观众厅时，也要考虑观众对声音的吸收。为了保证大厅内音质尽量少受观众人数的影响，应使空场状态下单个椅子的平均吸声量尽可能相当于一个观众的吸声量。

九、吸声结构

吸声结构是指具有吸声效果的物理结构。常用的有薄板结构、共振器结构、穿孔板组合共振结构和织物帘幕结构等。所有吸声结构的吸声原理，都是让声波在进入结构时消耗掉一

部分声能，从而达到吸声效果。采用什么样的吸声结构则要视具体声场指标要求、原始环境状况、视觉效果和资金能力等条件而定。

值得一提的是，用织物帘幕吸声结构，也就是利用悬挂帘幕的方法对各种声场环境进行改造，是一个相对便宜、实用的方法。即使在已经采用了薄板结构、共振器结构或穿孔板结构的厅堂内，也常会用悬挂帘幕的方式对声场环境进行“微调”，以适合不同音乐表演形式的音响需要。在所有织物中，以各种呢绒材料的吸声效果最强，在悬挂形式上，以多层、打褶的帘幕吸声效果最佳，层与层之间要有一定距离，至少在10厘米以上为好。将幕布、窗帘等与墙面、玻璃窗留有一定距离，尤如在多孔材料后面设置空气层一样，即使没有完全封闭，也可对中高频甚至低频具有一定的吸声作用。

第三节 音乐环境的隔声与隔振

听音乐的环境一般都要尽量避免外界声音的干扰，而专门制作音乐的环境，如录音棚，对外界声音更要“严格管制”。因而就提出了听音环境的隔声和隔振问题。

外界声音传进室内的途径有以下三种：

1. 由空气直接传入。声音可以通过房门、窗户或管道的缝隙传入室内。

2. 透过墙壁等隔离物传入。声音传到墙壁等隔离物时，声波将使墙壁如同膜片一样产生振动，在墙壁的另一面形成二次声源，将声音向室内辐射。

3. 固体传声。由于墙壁等隔离物受到机械撞击或振动后，振动通过隔离物传播，辐射出声音。

上述前两种情况，声音是在空气中产生和传播的，可以称为“空气传声”或“空气声”；第3种情况，一般称为“固体传声”或“撞击声”。实际上，撞击声也是要经过空气才能使人听到。

空气声和撞击声的隔绝方法是不同的，前者称为隔声，后者称为隔振。下面具体介绍一些有关隔声和隔振的理论和方法。

一、隔声问题

1. 隔声量。声音在空间传播的过程，如遇到一隔离物，一部分声能被反射，一部分声能被吸收，还有一部分声能则透过隔离物而传到另一空间去。

设入射声波总声能为 E_τ，透过隔离物而传到另一空间去的声能为 E_0，则隔离物的透声系数 τ 为：

$$\tau = \frac{E_\tau}{E_0}$$

在实际应用中，通常使用透声系数 τ 的倒数取常用对数乘以10的分贝数来表示隔声的程

度，称为“隔声量”R，或称为“透声损失”TL：

$R=TL=10\lg\frac{1}{\tau}$（分贝）

τ 值越小则 R 值越大，代表隔离物的隔声性能越好。由于同一隔离物对不同频率声音的隔声性能可能不同，所以，通常取中心频率为125、250、500、1000、2000、4000赫兹的6个倍频程的 R 值来表示某隔离物的隔声性能。

2. 单层墙的隔声。墙的单位面积质量越大，透声系数越小，隔声效果就越好。这可称为隔声的质量定律。它适用于平均隔声量在50~55分贝以下的墙。在实际中，由于存在各种复杂的共振条件，质量定律会在一定程度受到限制和修正。低频的共振会受墙的质量及劲度控制，而高频则受到墙体内部阻尼和边缘紧固条件因素的影响。质量定律说明，当墙的质量或频率每增大一倍，隔声量将增大6分贝，但质量增大一倍，建筑费用也要相应增加一倍。为了增大隔声量但又不过分增加墙体厚度，大多采用双层墙结构。

3. 双层墙的隔声。双层墙能够提高隔声能力的主要原因是由于两层墙之间有空气层，振动通过空气层传到第二层墙，再由第二层墙传到另一房间，空气层的弹性起到了减振的作用，使第二层墙的振动大为减弱，提高了墙体的隔声能力。

双层墙之间不能有刚性材料的连接，否则将使隔声量降低15~30分贝。因此，在实际施工中，对双层墙的建造要求十分严格。要防止双层墙之间被固体连接物所“短路”，影响隔声量。

另外，双层墙之间的空气层与双层墙可构成一个共振系统，所以，当双层墙的共振频率小于30~50赫兹时，隔声效果才好。也可以用松软的多孔性吸声材料来填充空气层，以提高隔声量。

4. 门和窗的隔声。录音棚的录音控制室，与录音大厅之间有玻璃观察窗。它的玻璃应为2~3层，玻璃彼此之间不能平行，以免引起单一频率共振。通常靠近控制室一端的玻璃下部应向里倾斜，以免反光射向调音师。玻璃与窗框间应密封。录音棚的门应采用大重量的，通常门的中部为钢板。门与门框间应密封，通常包以毛毡。录音棚通常用里外两扇双重门，在两门之间形成一个空间，称为声闸或声锁，声闸深度应大于1.5米，面积应大于2平方米。

5. 门窗对墙壁隔声量的影响。当墙壁上开有门窗后，由于门窗的隔声要比墙壁差，因而会使总隔声量减小。

设墙壁的透声系数为 τ_1，窗的透声系数为 τ_2，门的透声系数为 τ_3，墙壁的面积为 S_1，窗的面积为 S_2，门的面积为 S_3，于是总的透声系数 τ 为：

$$\tau=\frac{\tau_1S_1+\tau_2S_2+\tau_3S_3}{S_1+S_2+S_3}$$

因而总隔声量 R 为：

$$R=10\lg\frac{1}{\tau}(\mathrm{dB})$$

假设某墙壁的 R_1=50分贝，面积 $S_1=20\mathrm{m}^2$，在墙壁上开了一个门，R_2=20分贝（即 $\tau_1/10^2$），

面积 $S_2=2m^2$，现在来求总隔声量。计算方法为，先求 τ：

$$\tau=\frac{20\times10^{-5}+2\times10^{-2}}{20+2}=9.1\times10^{-4}$$

得出总隔声量为：

$$R=10\lg\frac{1}{\tau}=10\lg\frac{1}{9.1\times10^{-4}}=30.4\ (\mathrm{dB})$$

即开门比没有门的墙壁隔声量降低了20分贝。由此可以看出，孤立地提高墙的隔声量意义并不大，关键看是否开了门。

6. 孔隙对隔声的影响。当声波遇到墙面上的孔隙时，如果声波波长小于孔隙尺寸，则全部声能可以透射过去，即 $\tau=1$。如果声波波长大于孔隙尺寸，则透射量与孔隙形状及孔隙深度有关。长条形孔隙要比同样面积的圆形孔隙透射量大；孔隙越厚，透射量越小。由于门窗的缝隙大多是长条形，因而要特别予以注意。一面隔声很好的墙，如果上面有一个面积为1/100到1/1000的洞，它的隔声效果就会降低20~30分贝。因此，要想得到一个安静的环境，对于墙壁、门窗上的孔洞和缝隙必须进行密封。

7. 隔声屏与小型隔声室。在较大的录音棚中大多备有隔声屏或小型隔声室，用于多轨同步录音时隔离那些较响的乐器。隔声屏既要起到隔声作用又要起到反射声波的作用，因此大多是一面为吸声的，另一面为反射声的。常用的小型隔声室高度约为2.25米，小的面积只有几平方米，大的面积约10平方米。隔声小室的混响时间很短，特别在低声频段，约为0.2秒。室内的吸声材料要不对称布置，室形要不规则，以解决小室内的声染色问题。它的四周面板与隔声屏相似。通常可以在完全封闭、顶部半开、拆下后板、拆下前板等几种状态下使用。完全封闭状态时隔声量大约有15分贝。

二、隔振问题

声音在固体中传播时，速度要比在空气中传播时快得多，而衰减得却较慢。有些录音棚由于客观条件所限，只能建在交通要道附近，特别容易受到来往车辆振动的影响，因而就需要作隔振处理。要想隔绝固体传声，应设法消除振动源或撞击源与隔离物之间的刚性连接。通常采用如下三种措施来予以解决。

1. 在地板或楼板表面铺设一层弹性面，例如地毯、橡胶或软木垫层等，用来消耗撞击振动的能量。

2. 在楼上房间的结构楼板上加装弹性垫层或隔振垫层、垫块，如矿棉毡、橡胶等，再在该弹性垫层上做室内地面，形成浮筑结构，使由楼板面层结构传给楼下的振动大为减弱。

3. 采用“房中房”构造。“房中房”由外层结构、内套房和弹性垫层三部分组成。外层结构与内套房之间应无刚性连接，以隔绝固体声的传播。弹性垫层可采用橡胶隔振器或金属弹簧隔振器。

第四节　音乐与空间环境的匹配

音乐活动的形式多种多样，每种形式若想取得最佳音响效果，就必须考虑空间环境的匹配问题。首先应当确定音乐活动的音响类型。从规模角度上讲，音乐可分为大型、中型和小型三种；从体裁角度，可分为歌剧、交响乐、军乐、室内乐、独奏、协奏、独唱、合唱（清唱剧）等；从音乐呈示角度，可分为现场音乐和录制音乐等。理论上讲，不同种类的音乐活动其音响各具特色，因此需要与之相匹配的空间环境。

在选择合适的音乐空间环境问题上，有几个关键因素应当特别加以注意。

一、容积因素

容积因素，也就是空间的大小。众人皆知，大型音乐演奏活动需要较大的音响空间，小型音乐演出需要较小的环境，这样才能保证音响有充分的展示空间，但有时也不能一概而论，还要看具体乐器的发声特性。譬如，有些小型乐队，虽然人数不多，但乐器的音量很强，如中国的吹打乐，里面有唢呐和锣鼓等音量较大的乐器，虽然整体人数不多，但也不适合在小型音乐厅演出。

表15-1是在不用扩声系统情况下，音乐演出规模与最大空间匹配要求，超过允许值，就可能出现“听不清”的问题。

表15-1　常用音乐演出规模与最大空间匹配要求

音乐类型	最大允许容积（m^3）
独唱、独奏、弦乐重奏、小合唱	8000
室内乐、管乐重奏、合唱	10000
歌剧、清唱剧、交响乐	20000

二、混响时间

音乐厅的混响时间与音乐的类别和作品密切相关。原则上交响乐音乐厅要求混响时间较长，室内乐厅、合唱厅（演唱厅）次之；重奏（唱）和独奏（唱）厅较短。一些世界著名音乐厅的混响时间都很长，一般在1.7~2.0秒范围内。被誉为演奏圣地的奥地利维也纳音乐厅，荷兰的阿姆斯特丹音乐厅的混响时间均为2.05秒（中频500赫兹），但混响时间过长（如大于2.2秒），有可能破坏旋律的清晰度和声部的均衡度。一些音乐家认为维也纳音乐厅就已经存在音响过于丰满的问题，该厅仅对浪漫派音乐较为适合，对欧洲古典乐派的作品来说，很难显示演奏家弓上和嘴唇上的细微技巧。

混响时间与音乐的作品也有密切关系，对于古典音乐，一般认为其最佳混响时间在1.5~1.7秒之间，浪漫派音乐为2.0~2.1秒，前者可以展现莫扎特和其它古典作曲家音乐的清晰、细致的特点，后者则为勃拉姆斯、施特劳斯和马勒的后期浪漫派音乐提供融洽浑厚的声音。对于现代音乐，则以取1.8~1.9秒为宜。

三、座位容积比

这是被人们常常忽略的问题。所谓“座位容积比”是指音乐厅的容积与座位数量的比例，一般以单个座位所占容积值来表示。值越大，单位空间里面的座位数量越少。因为每个听众都是一个“吸声体”，当音乐厅坐满听众，其混响时间自然就会比空场时要短一些。同样的容积，座位越多，观众数量对混响时间的影响力就越强，这当然不利于音乐演出的效果。因此，对不同类型的演出，要选择不同座位容积比的声场来匹配。表15-2是专家建议的座位容积值：

表 15-2 建议座位容积值

空间环境及音乐类型		容积比值（m^3/座）
音乐厅	交响乐、协奏曲	7.0-10.0
	室内乐	≯ 6.0
	合唱	5.0
剧院	西洋歌剧	5.0-6.0
	地方戏曲	4.0

四、舞台环境条件

舞台环境条件的好坏对演奏者的演出质量和心理影响是至关重要的。其中要特别重视的是以下几个因素：

1. 舞台的声场分布要均匀，不能有回声或颤声。

2. 不同的演出规模和乐器种类要选择不同的排阵位置，以获得最佳直达声和反射声的比例。譬如，在悬挂有反射板的音乐厅演出时，独奏或独唱者一定要选择有充分反射声的位置，这个位置或许是在稍微靠台里的位置（即不一定在台口处），虽然离听众稍远一些，但凭借充分的反射效果反而能使声音灌满全场。

3. 舞台地面要坚实，以避免对低频有过多的吸收。

五、反射声和环境噪声

这主要是针对露天演出环境而言。一般情况下，在没有扩声设备情况下，露天音乐演出的效果都比较差。这主要是因为缺乏足够的反射声，以及环境噪声的干扰所致。因此音量不

大的音乐表演尽可能避开这种声场。比较适合露天环境的音乐类型当属铜管乐队和我国的民族吹打乐。但即使是这些力度较大的乐队，在选择环境上也要注意反射声和环境噪声的问题：一是要尽可能利用现场的反射体，假如露天舞台背后没有反射面，可以用一些活动挡板放在表演者的身后，以增强反射效果；二是在选址时要尽可能避开噪声源。

这里顺便提及一个与个人或家庭音乐生活有关的问题，就是音乐产品质量与环境的关系。我们大家可能都有这样的体验，有时我们购买的音响产品或乐器，待回到家后声音会发生变化，有的是变好，有的则是变坏。譬如一架钢琴在卖琴的地方听起来挺舒服，搬回家后声音感觉变“闷”或变得“太亮”了，这就是环境因素在起作用。因为你家里由于房间体积和装修的原因，对高频吸声能力与琴行的声场环境不一致，钢琴声音中的高频有可能被减弱，也有可能被增强，故而发生了音色变化。音响产品也是如此，一款价格昂贵的“发烧级”音响到了你家，可能完全失去音乐逼真度，如果不是买到假货，那你就需要从环境的角度来寻找问题的原因才对。

第五节　小型音乐制作室

随着电子乐器和小型录音设备的普及，小型音乐制作室应运而生，甚至家庭音乐制作室也屡见不鲜。这类音乐室在声场环境上大都存在以下问题：

第一，容积量不大，操作间面积一般在15~50平方米，房间高度不超过3米。录音间的容积也大致相仿。

第二，操作间设备林立，机器噪声较大。

第三，隔声条件不好，易受环境噪声干扰。

毋庸置疑，这些不利条件会给音乐制作带来一些负面影响，但如果充分了解了声场与音乐音响之间的关系，就能最大程度地消减上述不利因素的影响。

常见的音乐工作室可分两大类，一类是MIDI音乐制作室，另一类是音频录制/编辑制作室。虽然它们的功能不同，但在空间尺寸和声学环境要求上有相似之处，即在相对较小的空间中获得可塑性很强的声场环境。因此对音乐工作室最基本的要求，就是要“干净而透明”。体现在声学指标上，就是要做到：

第一，混响时间较短，一般不超过0.8秒。

第二，尽可能压低环境噪声，一般不超过25分贝（以能听到自己鼻息为标准）。

第三，声场分布尽可能均匀，没有声染色。

第四，功放和音箱的频响范围和声音品质具有“透明”性，没有特定声音品质。音箱摆放要对称、合理，能够给听者一定移动的自由度。

要实现上述要求，这里介绍几种比较实用的手段：

其一，就是要充分利用室内的地毯、沙发、书架、书桌、吊灯、盆景以及挂在墙上的饰物，这些都是很好的吸音和扩散声音的材料；

其二，就是尽可能将噪音较大的设备（主要是那些带散热风扇的设备）移出室外，或者加以“掩藏”，以降低背景噪声；

其三，避免将室内家具对称摆放，减少发生“声染色”（即某一频段声音得到过份加强或减弱）的可能性；

其四，要训练自己的听觉具有一定的“修正”机能，即知道自己环境声场之不足，从而在音乐制作时能够在音响上给予修正，不至于出现“在自己制作室里效果甚佳，拿到外面大失水准”的窘况。

在小型音乐制作室工作，需要一种与在大空间不同的听觉理念，其中首要的是要具有“模拟声场”的概念。

一、模拟声场概念

模拟声场是指利用非空间手段生成的特定的声场效果。声场是一种客观存在。我们的耳朵在长期听觉活动中能够对不同声场的音响效果产生较深的记忆，包括声音的远近、左右、大小、虚实、明暗等，这些因素综合构成听觉对“声场”的主观意象。

对小型音乐制作室来说，主要是凭借电子手段生成模拟声场，因此音乐制做人首先要具备模拟声场的耳朵，即在大脑中要建立对各种典型声场的主观意象。传统音乐创作方式，无论写作、录音还是音乐厅演出时，各种不同乐器的空间位置已经事先排好，作曲家在创作音乐时，较少考虑“声场”问题；而在计算机音乐工作室中，作曲家是同喇叭打交道，他既要为每一种声音事先排好空间位置，还要模拟出各种各样的声场环境。

音乐制作人还要懂得不同类型声场与音乐风格的关系：传统音乐厅的声场效果让人联想古典和浪漫派音乐；教堂的声场环境让人联想宗教无伴奏合唱；小型音乐厅声场使人联想巴洛克音乐风格；大型空间声场则容易使人联想通俗乐队的宏大演出场面；而左中右声道飘忽不定的声场马上会让人置身于电子音乐的氛围中。

二、制造模拟声场的手段

目前在音乐制作中常用的调控手段有以下几种：

1. 混响。一个声音在不同大小空间环境中的反射声的多少、大小、长短是不一样的。在电子合成器中可以通过对混响效果器的调整，控制反射声的多少、大小和长短，达到模拟不同空间环境的效果。

2. 延时。延时不同于混响，它控制声音到达的时间。通过延时控制，我们可以增强乐队

中不同乐器的明暗和空间的对比效果。

3. 合唱效果。合唱效果是模拟两个以上发声体演奏同一个声部时，由于音高和时间上的差异所形成的群感。合唱效果可以调控声音的宽厚和窄薄。

4. 声像。通过将不同点上出现的不同乐器音色安排在左中右不同的声像位置，以模拟出声音的横向变化感。从而加强空间气氛的营造。

5. 音量控制。将音量控制同混响和亮度控制结合起来以加强声音的远近、虚实，明暗对比。遥远的声音，音量小，混响时间长，亮度级别低；近在咫尺的声音，音量大，混响时间短，亮度级别高。通过这种对比，可以加强声音的纵深感。

第六节　人工音效与杜比环绕声系统

随着电声技术的发展，人们对重放声音的逼真度有着越来越高的要求，其最高境界就是要完美地再现我们在音乐厅的听觉感受。于是各种各样的人工音效理论和技术也就应运而生。下面介绍几种目前常用的人工音效技术。

一、杜比降噪系统（Dolby Noise Reduction）

欲求音乐重放声音效果的逼真，首先要解决的问题就是要尽可能地降低噪音。在早期电声重放设备中，本底噪声（主要出现在中、高频）一直是磁带录音机无法克服的缺陷之一，由此使录音机的信噪比一直局限在50分贝左右，不能令音乐爱好者满意。如何降噪便成为科学界亟待解决的问题。

杜比技术出现之前人们曾尝试通过滤波器对高频噪音进行过滤，但对音质有较大损害。1967年美国人杜比（Ray Dolby）发现，磁带本底噪音的电平是基本不变的。在播放节目时，如果声音信号很大，那么磁带噪音就被掩盖而听不出来，如果声音信号很弱，不足以掩盖噪音，我们的耳朵就会明显地感到噪音的存在。举个例子，在播放磁带时，放到歌曲的高潮，音乐很响，我们根本不会觉察到噪音，一旦放到歌曲之间的间歇处或音乐很轻的片断，噪音就会明显地显露出来。据此，杜比发明了一种电路系统，在录音时加强小信号的强度，把声音信号和磁带噪音电平之间的差距拉开，大信号时则不做任何加强处理，以避免磁带饱和失真，这一过程称为“杜比编码”。在重放时，对信号做与录音时完全相反的衰减，声音信号被恢复到原先的水平，同时噪音也被降低了，这一过程称为“杜比解码”，由此巧妙地达到了降低噪音但不改变声音频响的目的。

杜比系统最初分为A、B两种，A系统能降低全频带噪音，但价格昂贵，仅供专业使用；B系统为民用产品，只降低高频噪音。由于价格便宜，又实现了集成化，容易安装在卡式录音机

上，杜比 B 系统很快风靡全球，成为应用最广泛的磁带降噪系统。至今，国外的大多数原声盒带仍在录音时经过杜比 B 编码，封套上印着杜比标志（见图15-3）。中、高档的录音机也大多有杜比 B 降噪功能。

图15-3 杜比系统标志

一般情况下，当信号强度为 −40 分贝时的信号杜比 B 就把100赫兹以上的声音信号加以提升，最高提升值达到10分贝，而对于较强的声音信号则基本不提升。当然，杜比系统只能降低磁带的中高频本底噪声，对节目源中固有的噪声无能为力。用一盒空白磁带翻录 CD 节目，杜比系统只能把空白磁带的本底噪音降低10分贝，对 CD 节目中固有的噪音不起任何作用。因为在翻录过程中，CD 节目中的固有噪音连同小信号一起被加强了，重播时，随着衰减而恢复原状，没有起任何变化。

在播放带有杜比 B 记号的磁带时，如果不打开录音机上的杜比系统，则磁带噪音并无降低，但可以感到声音中高频成分过多，显得很亮，这是因为杜比系统在录音时加强了高频信号的结果。只要开启杜比系统，对加强的信号进行衰减还原，声音就恢复正常了，同时噪音明显减轻。有些人认为，在高频响应较差的低档录音机（或磁头已严重磨损的录音机）上播放杜比 B 磁带时，可以不开杜比系统，使高频损失得到一定弥补。

用高标准衡量，杜比 B 系统10分贝的降噪量显然还不够。在音乐的低潮处或空白片断，噪音仍清晰可闻。60分贝的信噪比刚及得上慢转唱片，距 CD 音质还差许多。杜比实验室为了保持在这一领域内的领先地位，经过不懈努力，在1980年又推出了杜比 C 系统，把降噪范围展宽到全频带，降噪量扩大到20分贝，信噪比达到70分贝。

杜比 C 系统原理较为复杂，与杜比 B 相比，除保留降噪电路外，还包括了频谱偏移电路、防饱和电路等，大大改善了录音机的频响，减轻磁带高频饱和。较高档的录音卡座几乎都装有杜比 C 系统，但用杜比 C 编码的原声磁带还极为少见。在翻录 CD 时，杜比 C 是最有用的工具，能将磁带噪音几乎消灭殆尽。不仔细听的话，我们几乎无法辨别 CD 和用杜比 C 系统翻录后的磁带之间的差别。当然，如果一盒磁带在翻录时用了杜比 C，那么重放时一定要打开杜比 C 以使声音正确还原，不然的话我们只能得到失真的声音。杜比 B、杜比 C 虽然好，但并非完美。从理论上推断，它们不会对声音有任何不利影响，但事实上，用了杜比系统后，高频都有可闻的损失。听感上表现为高音变暗，频响变窄。当然，录音卡座的档次越高，这种影响越小。

除杜比系统外，专业上还有几种实用的降噪系统，如美国著名的分贝 X 公司推出的分贝 X 降噪系统，由 CBS 公司推出的 CX 降噪系统，这两种系统都是为针式唱片而设计的。此外，

还有一种称为“动态降噪”（Dynamic Noise Reduction）技术，简称“DNR”。其技术核心是一个由声音信号强度感应器控制的低通滤波器，当声音信号达到一定强度时，滤波器自动关闭，而强度一旦降低到一定程度，滤波器就会自动打开，滤掉所设定的频段内的声音。其他降噪系统均未能像杜比系统那样普及。

二、杜比环绕声系统

杜比环绕声系统是杜比公司研究发明的用于处理电影院音频系统的专利技术。在20世纪70年代后期，该公司就将杜比立体声（Dolby Stereo）专利技术应用于35mm电影，这标志着电影院多声道声音系统的真正开始。此后杜比公司又不断改进，推出了杜比环绕、杜比定向逻辑等一系列的音频处理技术，用于电影院和家庭影院中。

杜比环绕技术的核心是对音频信号的4-2-4编码解码技术，即在录音时，把原来的左、右、中、环绕四个声道的信号通过特定的编码手段将其合成为两个声道的复合信号；在还原声音时，通过解码器将两个声道的复合信号解码还原成原来的四个声道信号。这样做最大的好处是能够兼容原有的双声道立体声系统。由于杜比环绕技术经历了不断改进和从专业电影院应用到家庭影院的发展过程，所以其名称和标志也有多种，常常使人困惑，现将常见的几种列出如下：

1. Dolby Stereo：杜比立体声。这是最早（1976年）用于35mm电影的杜比矩阵四声道技术，为了与传统的双声道立体声区别而命名。

2. Dolby Stereo SR：Dobly Stereo的改进型。1987年推出，主要是克服Dolby Stereo声道隔离度不好的缺陷，采用了杜比矩阵四声道SR型编解码技术，而Dolby Stereo采用的是杜比矩阵四声道A型编解码技术。

3. Dolby Surround Basic：杜比环绕基本型。前面介绍的两种杜比技术是应用于专业电影院的，20世纪80年代初杜比公司又将其发展为应用于家庭影院的系统。由于民用产品在价格上必须大大低于专业产品，所以采用的技术及解码设备都有所不同，杜比环绕基本型只有左、右、环绕三个声道。

4. Dolby Surround Pro. Logic：专业杜比环绕逻辑系统。这是杜比公司于1987年推出的，由Dolby Stereo SR发展而来的用于家庭影院的杜比技术，它克服了杜比环绕基本型因采用廉价解码器而带来的部分声音信号丢失等缺陷，而且与专业影院系统一样含有四个声道，在解码器中使用了一种方位增强电路，故又称“杜比定向逻辑系统”。

目前的家庭影院杜比解码器基本上都采用的是杜比定向逻辑四声道解码技术，但习惯上人们并不严格加以区分，仍然称其为杜比环绕。

5. Dolby AC-3：也称“杜比数字”（Dolby Digital）。AC-3中的AC是Audio Coding（音

频编码)的意思,3是序号,此前还有AC-1和AC-2。AC-1是杜比公司为分贝S(直播卫星)而设计的,特点是解码器价格便宜,性能也较好,数据比特率为220Kbps~325Kbps;AC-2主要用于专业音响传输技术上,其压缩率和音质都比AC-1好,数据比特率为128 Kbps~192Kbps。AC-3与前面介绍的杜比环绕技术最根本的区别是:杜比环绕系统处理的都是模拟音频信号,而AC-3处理的是数字信号。AC-3目前被广泛用于DVD影碟中,美国的高清晰度电视也采用AC-3作为音频标准。

AC-3音频系统是全音域的5.1声道系统(五个声道的频率响应都为20赫兹-20K赫兹,±0.5分贝),这五个声道是左、右、中、左环绕和右环绕。5.1声道中的".1"是指超重低音声道,频响范围为20赫兹~120赫兹。AC-3将5.1声道的数字音频信号经过编码压缩以后形成单一的数字比特流,在还原声音时,通过AC-3解码器将比特流解码还原成5.1声道的音频信号。由于编码解码器处理的是数字信号,所以就不会出现杜比环绕技术中的声道分离度不佳等缺陷。

AC-3采用了一种称为ATC的第三代感觉编码技术,利用人耳的听觉效果来达到压缩信息的目的。举例来说,假设在你的周围有两个声音频率相近的人在讲话,其中一个声音很大而另一个声音较小,那么你就听不到较小的声音,这就是人耳的遮蔽效应。AC-3在压缩编码时,通过分析音频数据,将频率相近、音量较低的会被遮蔽的信息删除,将音量低于聆听界限的信息删除,这样将大量人耳听不到的音频信息去掉,达到压缩信息的目的。

三、其它音效系统

1. 数字影院系统(Digital Theater System),简称DTS。是DTS公司于1993年研究推出的全数字化多声道环绕声音频系统,采用了相干声学编码(CAC:Coherent Acoustics Coding)方式。DTS同AC-3一样具有全音域的5.1声道,但编码的压缩比为3:1~4:1,比AC-3的12:1能够保留更多的音频信息,在声音的层次性、细腻性方面均优于AC-3,因此大有后来居上之势。市场上的第三代DVD播放机均增加了DTS读取功能,采用DTS技术的DVD影碟也越来越多。美国电影《侏罗纪公园》《生死时速》等都采用了DTS音频编码技术。

2. THX家庭影院系统(THX Home Theater System)。20世纪80年代,美国卢卡斯电影公司为了改善影片在电影院的声音回放效果,制定了专供电影院使用的THX声音系统。之后,为了能在家庭环境中再现电影院里的完美音响效果,在杜比定向逻辑解码器的基础上成功地开发出用于家庭影院的Home THX Audio系统。THX并不是一种独立的声音回放系统,而是对经过杜比定向逻辑处理的立体声信号进行适当的后期处理,以便获得定位更为准确、动态范围较大的更为真实的音响效果。THX实际是建立在杜比定向逻辑基础上的家庭影院音响系统。

THX 系统比杜比定向逻辑环绕系统中的解码器多了个 THX 控制器，它由超低频电子分频（Subwoofer Electric Crossover）、再均衡处理（Re-Equalizer）、去相关处理（De-Correlation）和音色匹配处理（Timbre Matching）四部分组成。其中的超低频电子分频的作用是从左、中、右三个前置声道中分离出超低频声道，以增加这三个声道的动态效果。

3. 三维环绕声系统（3D Surround System）。三维环绕声是利用人耳听觉特性和听觉心理学，把普通的立体声信号经过一定的处理，通过两只音箱获得真实三维空间感的立体声声场的系统。三维环绕声系统有三大优点：首先是对音源没有特殊的要求，无须对节目源进行处理；其次可以利用原来的双声道立体声，用两只音箱即可享受真实地环绕声效果；再次是对环境没有严格的要求。其缺点也是显而易见的，声音的定位准确性和空间感比不上前述声音系统。

4. 杜比环绕增强系统（Doldy Surround EX）。杜比环绕增强系统有 6.1 个声道，即在 Dolby Digital 的 5.1 个声道之外又增加了一个后环绕声道（Back surround）又名“中央环绕声道”（Center surround）。在电影院中，环绕声场的扬声系统是由多个音箱组成的阵列，安装在左、右两侧及后侧的墙壁上。在 5.1 声道方式下，左侧后面环绕音箱的左半组被用于左环绕声道，右侧及后面环绕音箱的右半组被用于右环绕声道。变为 6.1 声道后，音箱的数量和安装位置并没有改变，但组合方式发生了变化：安装在后面的音箱被改用于后环绕声道，而左右环绕声道将只使用安装在左右侧墙上的音箱。

增加后环绕声道的目的是为了解决 5.1 声道的一些固有缺点。首先，5.1 声道的环绕声场是弥散的，这固然有利于获得更强的包围感，但影片中的某些场景需要声源具有较强的方向性时，这种弥散声场就无能为力了。听众虽然能感觉到声音是来自左面或右面，但无法确定地指出声源的方向。其次，5.1 声道无法制造出声音来自背后的效果，也无法产生出声音飞越头顶的感觉。6.1 声道的杜比环绕增强系统可以使上述问题得到改善。

2012 年，美国杜比公司推出了声感更为逼真的“杜比全景声”（Dolby Atmos），其原理是将相对固定的“场景声”（Channel Base）和移动的“物体声”（Object Audio）分别处理、压缩、重放，进而实现了更为细致的声景重现。目前用于商业影院的杜比全景声一般由 9.1 声道（7.1 声道加 2 个头顶声道 ）的场景声和最多达 128 个声道的物体声构成。

章后思考与讨论题

1. “空间音乐声学”与“厅堂声学”或“室内声学”的主要区别在哪里?

2. “空间音乐声学”主要研究哪些问题?

3. 良好的空间音乐声学环境应当符合哪些基本要求?

4. 若想在音乐演出中让声音体现出“亲近感”,声场中直达声与第一反射声之间的间隔应控制在多少毫秒范围内?

5. 赛宾混响时间计算公式如何表达?

6. 设计小型录音棚时需要注意哪些声学参数?

7. 设计一个音乐空间时,演员区域和听众区域的声场环境要求能否统一? 为什么?

8. 为什么教堂的混响时间往往很长? 这种声场环境适合什么样的音乐演出?

9. 何谓“模拟声场”? 该声场模拟的对象是什么?

附　　录

常用乐器频率范围一览表

西洋乐器

乐器名称	基音频率范围（Hz）	频谱频率范围（Hz）	能量较集中的频率范围（Hz）
小提琴	196~2093	196~19800	250~3000
中提琴	131~1046	131~12000	175~3500
大提琴	65.4~523.3	65.4~14000	180~3000
低音提琴	32.7~211.6	32.7~8000	35~200
短笛	587~4186	587~19200	1000~2000
长笛	246.9~2489	246.9~19300	350~1000
双簧管	233~1760	233~9500	300~5000
英国管	155.6~922.3	155.6~13000	500~1500
单簧管	146.5~1976	146.5~10000	160~-450
低音单簧管	69.3~698.5	69.3~10000	180~350
大管	58.3~784	58.3~7300	350~1000
低音大管	29~196	29~2500	220~350
♭B 高音萨克斯管	207.7~1244.5	—	—
♭E 中音萨克斯管	138.6~830.6	—	—
♭B 次中音萨克斯管	103.8~-622.3	103.8~10000	103.8~300
♭E 低音萨克斯管	69.3~415.3	—	—
小号	164.8~1397	164.8~15400	1000~1500
圆号	61.7~-689.5	61.7~15000	85~1000
长号	82.4~544.4	82.4~15000	82.4~2000
大号	41.2~196	41.2~10000	55~1000
钢琴	27.5~4180	27.5~18500	27.5~2000

（续表）

乐器名称	基音频率范围（Hz）	频谱频率范围（Hz）	能量较集中的频率范围（Hz）
竖琴	32~3136	32~19800	700~4000
木琴	196~2217.5	196~19000	500~1500
小军鼓	—	80~18000	80~500
高音定音鼓	233~349.2	—	—
中音定音鼓	103.8~155.6	—	—
低音定音鼓	87.3~130.8	—	—
特低音定音鼓	61.7~-110	—	—
碰铃	—	200~18300	8000~9500
三角铁	—	200~17800	4500~7000
沙锤	—	200~19800	5000~8000
大锣	—	300~9500	300~800
铃鼓	—	300~9500	5000~7000
响板	—	200~19800	1600~3600
小钟琴	523.3~2637	523.3~19000	4000~8000
排钟	—	200~-18500	1500~2500
大鼓	—	50~5600	500~1000
大钹	—	3000~20000	200~2000
吊钹	—	100~11000	1500~4500

中国民族乐器

乐器名称	基音频率范围（Hz）	频谱频率范围（Hz）	能量较集中的频率范围（Hz）
京胡(D 调)	440~1985	440~20000	440~2500
高胡	440~2637	440~20000	440~2000
二胡	294~2352	294~12000	350~1500
中胡	196~880	196~8200	300~800
马头琴	220~2101.7	220~19000	440~2100

（续表）

乐器名称	基音频率范围（Hz）	频谱频率范围（Hz）	能量较集中的频率范围（Hz）
板胡（G 调）	590~3537	590~20000	600~1200
坠胡（二弦）	220~1575.2	220~9500	440~1500
梆笛（G 调）	590~3151.5	580~18000	580~2500
巴乌（F 调）	131.4~702	131.4~8600	260~3000
管子（D 调）	440~2362.1	440~18000	880~10000
箫（G 调）	295~1325.4	295~19500	500~1500
D 调高音唢呐	440~1985.4	440~17800	2000~3500
高音笙（十七簧）	440~1180.1	440~20000	440~4000
中音芦笙（十八簧）	220~1180.1	220~16000	440~3000
琵琶	110~1325.4	110~17800	220~2000
三弦（大）	98~2360	98~8000	500~800
柳琴	197~6300	197~20000	4000~11500
中阮	65.7~662.7	65.7~8600	200~500
扬琴	98~1576	98~10300	250~950
筝（二十一弦）	74~1180.1	74~16000	250~550
大鼓	—	50~5500	50~200
排鼓	—	150~7000	150 —500
大锣	—	60~5500	100 —1000
武锣、苏锣	—	400~20000	400 —1000
小锣	—	445~20000	1500~1800
月锣	—	800~15000	1500~1800
云锣（硬槌）	—	370~20000	500~5000
云锣（软槌）	—	370~4500	500~4500
板鼓	—	700~20000	2000~2500
拆板（响板）	—	400~18000	1500~3500
大钹	—	130~14300	130~2000
小钹	—	430~2000	430~550
木鱼	—	700~18000	800~-1800
南梆子	—	450~13000	1200~1500

常用乐器的峰值声压级与动态范围一览表

西洋乐器

乐器名称	数量	传声器与乐器的距离(m)	峰值声压级(dB)	最低声压级(dB)	经常出现的声压级范围(dB)	动态范围(dB)
小提琴	1	0.55	107	57	75~92	50
中提琴	1	0.55	109	60	75~94	49
大提琴	1	0.60	110	68	72~90	42
低音提琴	1	0.50	104	65	72~90	39
短笛	1	0.50	119	65	74~92	54
长笛	1	0.50	119	65	68~99	54
双簧管	1	0.55	105	72	75~90	33
英国管	1	0.55	108	70	75~96	38
单簧管	1	0.50	112	60	75~99	52
萨克管	1	0.55	115.5	73.5	85~99	42
大管	1	0.45	106	68	73~90	38
低音大管	1	0.35	99	77	84~105	22
小号	1	0.85	132	74	79~90	58
小号加弱音器	1	0.85	—	68	82~102	—
圆号	1	0.55	115	75	—	40
圆号加弱音器	1	0.55	—	70	92~107	—
长号	1	0.90	124.5	80	75~92	44.5
长号加弱音器	1	0.90	—	—	85~99	—
钢琴(开盖)	1	0.50	117	67	77~97	50
竖琴	1	0.30	117	58	73~87	59
木琴	1	0.50	112.5	65	73~87	47.5
铝板钟琴	1	0.45	113.5	78	83~98	35.5
定音鼓	1	0.55	132	75	88~105	57

（续表）

乐器名称	数量	传声器与乐器的距离(m)	峰值声压级(dB)	最低声压级(dB)	经常出现的声压级范围(dB)	动态范围(dB)
小军鼓	1	0.50	125.5	72	84~98	53.5
碰铃	1	0.30	118	70	78~88	48
三角铁	1	0.40	112	74	98~86	38
沙锤	1	0.40	105	62	78~88	43
大锣	1	0.65	122	92	100~104	30
铃鼓	1	0.30	119	65	90~103	54
小钟琴	1	0.35	118.5	75	80~94	43.5
大钹	1	0.90	132	70	85~100	62
钢片琴	1	0.20	104	68	78~85	36
爵士鼓	1	0.50	126.5	72	88~103	54.5

中国民族乐器

乐器名称	数量	传声器与乐器的距离(m)	峰值声压级(dB)	最低声压级(dB)	经常出现的声压级范围(dB)	动态范围(dB)
曲笛	1	0.50	112	68	75~100	44
梆笛	1	0.50	112.5	65	80~98	47.5
短笛	1	0.50	113	73	82~97	40
新笛	1	0.50	107.5	67	73~92	40.5
箫	1	0.25	99.5	60	68~84	39.5
高音唢呐	1	0.60	116.5	75	86~102	41.5
低音唢呐	1	0.60	115.5	79	88~102	36.5
高音笙	1	0.65	118	64	67~88	34
琵琶	1	0.62	115	65	70~88	50
三弦	1	0.70	117.5	65	78~88	52.5
柳琴	1	0.60	114.5	64	68~85	50.5
中阮	1	0.70	112.5	65	73~88	47.5
扬琴	1	0.52	110	67	74~94	43

（续表）

乐器名称	数量	传声器与乐器的距离(m)	峰值声压级(dB)	最低声压级(dB)	经常出现的声压级范围(dB)	动态范围(dB)
大鼓	1	0.60	131	85	94~109	46
排鼓	1	0.50	129.5	80	92~108	49.5
锣	1	0.60	123	86	98~108	37
板鼓	1	0.50	132	70	85~95	62
大镲	1	0.90	132	70	85~100	62
小镲	1	0.90	135	82	88~100	53
板	1	0.40	126	—	—	—
木鱼	1	0.35	124.5	68	77~90	56.8
小木鱼	1	0.30	123	68	78~88	55
梆子	1	0.40	108	68	72~88	40
南梆子	1	0.35	132	72	80~90	60

噪音的种类

一、白噪声

白噪声在整个频谱内每个频点的能量为常数，且基本恒定，不管对信号进行低通滤波器还是高通滤波器处理，均不能有效地滤除白噪声，因为它存在于整个频带范围内。白噪声是随机的，它不具有相关性，故也没有偏差，因此，白噪声可以叠加到信号和算法中，或始终存在于模 / 数转换器中，而不会造成长期误码。通过恰当的处理，白噪声还可以用来创造声音，包括人的声音和自然界的声音，甚至还能合成其它噪声。

人类对白噪声的了解已经非常充分，并能熟练地从中提取很多有用的信息。白噪声甚至具有医疗功能，有些医学专家（主要是内科医生和牙医）还成功地在试验中将白噪声应用于轻度麻醉。

一般来说，通过随机数字发生器可以生成白噪声，但实验表明要生成理想的白噪声很难，其它噪声的合成也与此类似。

二、粉红噪声

在给定频率范围内（不包含直流成分），随着频率的增加，其功率密度每倍频程下降3分贝（密度与频率成反比）。每倍频程的功率相同，但要产生每倍频程3分贝的衰减非常困难，因此，没有纹波的粉红噪声在现实中很难找到。粉红噪声对于测量音频设备的频率响应和决定房间的扩音应用非常有用。

三、红噪声

红噪声来自海洋学的概念。这是有关海洋环境的一种噪声，由于它是有选择地吸收较高的频率，因此称之为红噪声。

四、橙噪声

该类噪声是准静态噪声，在整个连续频谱范围内，功率谱有限且零功率窄带信号数量也有限。这些零功率的窄带信号集中于任意相关音符系统的音符频率中心上。由于消除了所有的合音，这些剩余频谱就称为“橙色”音符。

五、蓝噪声

在有限频率范围内，功率密度随频率的增加每倍频程增长3分贝（密度与频率呈正比）。

对于高频信号来说，它属于良性噪声。

六、紫噪声

在有限频率范围内，功率密度随频率的增加每倍频程增长6分贝（密度正比于频率的平方值）。

七、灰噪声

该噪声在给定频率范围内，类似于心理声学上的等响度曲线（如反向的 A- 加权曲线），因此在所有频率点的噪声电平都相同。

八、棕噪声

在不包含直流成分的有限频率范围内，功率密度随频率的增加每倍频程下降6分贝（密度与频率的平方成反比）。该噪声实际上是布朗运动产生的噪声，它也称为随机飘移噪声或醉鬼噪声。

九、黑噪声

又称“静止噪声”。在20000赫兹以上的有限频率范围内，功率密度为常数的噪声，一定程度上它类似于超声波白噪声。这种黑噪声就像“黑光”一样，由于频率太高而使人们无法感知，但它对你和你周围的环境仍然有影响。

男中音不同声区正确发声共振峰数据[1]

示范发声：黎信昌[2]

元音	共振峰	高音(f^1)	中音(c^1)	低音(d)
a	基音强度(dB)	>95	>102	>98
	峰宽频域(Hz)	2000~3100	2200~3000	2200~3100
	峰高强度(dB)	70~90	80~100	70~90
e	基音强度(dB)	>95	>100	>97
	峰宽频域(Hz)	1300~3100	1700~3000	1300~3000
	峰高强度(dB)	80~100	80~100	70~90
i	基音强度(dB)	>96	>100	>97
	峰宽频域(Hz)	1300~2900	1500~3000	1600~3000
	峰高强度(dB)	78~96	80~90	70~90
o	基音强度(dB)	>93	>89	>95
	峰宽频域(Hz)	2400~2900	2300~3000	2200~3000
	峰高强度(dB)	72~88	80~93	70~90
u	基音强度(dB)	>94	>87	>90
	峰宽频域(Hz)	2300~2900	2300~2800	2200~3000
	峰高强度(dB)	70~90	80~90	70~80

[1] 表中相关名词解释请参见本书第十四章《歌唱声学研究》。

[2] 黎信昌先生为中国中央音乐学院声乐系教授，曾赴意大利学习美声唱法。

参考文献

中文书目

[1] 陈小平编著:《电声学基础及应用》,北京工业大学出版社 1998 年版。
[2] 戴定澄著:《欧洲早期和声的观念与形态》,上海音乐出版社 2000 年版。
[3] 戴念组著:《中国物理学史大系—声学史》,湖南教育出版社 2001 年版。
[4] 杜功焕等编著:《声学基础》(上、下册),上海科学技术出版社 1981 年版。
[5] 斐宏恩著:《耳聋与复聪》,科学普及出版社 1986 年版。
[6] 甘智林著:《耳聋的原因及诊断》,上海科学技术文献出版社 1985 年版。
[7] 龚镇雄编著:《音乐声学—音响·乐器·计算机音乐·MIDI·音乐厅声学原理及应用》,电子工业出版社 1995 年版。
[8] 汉斯立克著:《论音乐的美》,相业治译,人民音乐出版社 1986 年版。
[9] 湖北省博物馆编:《曾侯乙编钟》,湖北人民出版社 1992 年版。
[10] 金观源编著:《生物钟与健康》,福建科技出版社 1998 年版。
[11] 梁广程编著:《乐声的奥秘》,人民音乐出版社 1986 年版。
[12] 马大猷编著:《环境声学》,科学出版社 1984 年版。
[13] 缪天瑞著:《律学》,人民音乐出版社 1983 年版。
[14] [俄] 斯波索宾著:《音乐基本乐理》,汪启璋译,人民音乐出版社 1982 年版。
[15] 孙玉温著:《听觉比较生理学》,中国科学技术大学出版社 1994 年版。
[16] 项端祈编著:《实用建筑声学》,中国建筑工业出版社 1992 年版。
[17] 张绍高编:《室内声学与厅堂扩音》,北京广播学院录音艺术学院教材 1998 年版。
[18] 朱伟编著:《录音设备与节目制作》,北京广播学院录音艺术学院教材 1998 年版。

外文书目

[1] Leo L. Beranek. Music, Acoustics and Architecture, New York Wiley,1962.
[2] Perry R.Cook Edited. Music, Cognition, and Computerized Sound, An Introduction To Psychoacoustics, The MIT Press, 1992.
[3] Eleanor Selfridge-Field Edited. Beyond the MIDI: The Handbook of Musical Codes, The MIT Press, 1997 Bernd Enders Edited. Neue Musiktechnologie, Universitaetsverlag Rasch, 1999.
[4] Harvey Fletcher.Speech and Hearing, D.VAN NOSTRAND COMPANY, INC., 1929.
[5] H.von Helmholtz. On the Sensation of tone, As a Physiological Basis for the Theory of Music, 4th ed. Tran. by A. J. Ellis, New York Dover, 1954.
[6] Brian C.J. Moore. An Introduction to the Psychology of Hearing, New York Academic Press, 1982.
[7] Thomas D. Rossing. The Science of Sound, Addison-Wesley Publishing Company,1982.
[8] Carl E. Seashore. Psychology of Music, McGraw-Hill Book Co., 1938.
[9] Johan Sundberg. The Science of the Singing Voice, Northern Illinois University Press, 1987.
[10] Alexander Wood. The Physics of Music, Read Books; 6th ed, 2007.
[11] Fritz Winckel. Music, Sound and Sensation, New York Dover Publications, 1967.

再版后记

一般说，一本书经过10多年后再版时，应当补充较多的新资料和新成果，遗憾的是，我这本书没有做到。究其主要原因，是与我工作变更有关。本书第一次出版是在2003年，当时我还在中国艺术研究院音乐研究所工作，日常工作以研究为主，研究生教学为辅，故而有较多时间从事音乐声学研究。后来随着先后转到中央音乐学院和中国音乐学院工作，工作性质发生了转变，每天面对的都是本科生、硕士生、博士生，大课、小课、专业课、专业基础课应接不暇，做研究的时间自然就挤没了。虽然为了给研究生开题也做了一些与之相关的资料查询和分析，但终因时间有限不能深入下去，遗留问题很多，自然也不能作为研究成果拿出来。

此外，近10年来网络技术的发展，也是让我迟迟没有再版此书的原因之一。我认为，像音乐声学这种技术时效性较强的学科，似乎已没必要再利用纸介质印刷品来进行信息交流。今天，打开计算机和各种移动终端，与音乐声学相关的知识、研究成果甚至音视频作品都能一览无余，这些信息远比一本白纸黑字的书籍丰富、生动。多年前当我知道这本书的复印版已经在网店上售卖时，虽然知道这是一种侵权行为，但作为一位教师，我从心里还是感谢这些网店。这些网店毕竟利用现代信息流通技术间接为音乐声学知识的普及做了有益工作。同时也从时间上缓解了我再版此书的压力。

最终促使我决意再版此书的直接原因还是由于网络。随着网络版的流通，存在于本书中的种种错误也误导了不少学生。面对学生的质疑，我突然意识到问题的严重性。古训有“文章千古事，得失寸心知”，而在今日网络环境下，文章的错误已不是“寸心知”的问题，而是“得失天下知”也！即便没有新成果，再版工作也应尽快上马了。由此讲，此版本也可称为“纠错版”吧。

除了纠错，本版书还做了几项改动：删掉了一些已失去时效性的资料，在书后加入了附录。总的意图是为了方便学生和自学者阅读。顺便说，作为本书的作者，我希望出版社能将此书放到一个开放的网络平台，或者做成一个在线的多媒体版本，在不影响出版社版权前提下能让读者随时对此书中的错误进行指正，同时也能在线观看书中的音乐声学影像资料。

这本书的再版工作是在很多同学帮助下完成的。屈歌博士在仔细阅读的基础上给出了许多具体修改意见，李子晋博士为本书编制了名词索引。静恩涛同学在仔细通读全书基础上提出了很多有益修改意见，并完成书稿打印工作。此外，还有很多朋友、同事、同学对本书中存在的种种错误提出很好的修改建议，由于篇幅关系恕不一一列名。在此我谨对大家的帮助表示深深谢意。

韩宝强

2014年12月5日

书名
目录
D ò ??
??o ó ???? ó ? ì ??? ì a
µ ú ò ??? ì y??? µ í 3
µ ú ò ?? ú ì y??? µ í 3 µ ? é ú à í 113 é ó ?1|?
ü
µ ú ?t? ú 1? ' ? µ ?? ú ò ? à ??D µ ? × ÷ ó ?
µ ú è y? ú ì y???e é ?
µ ú ??? ú ì y á |? ì 2a
µ ú ??? ú ± £ ? ¤ ?? µ ? ì y??
??o ó ???? ó ? ì ??? ì a
µ ú ?t?? ì y??? µ í 3?? ò ??? µ ? ê ? ± e
µ ú ò ?? ú ò ??? ê ? ± e? ú ?? µ ?? ù ? µ
µ ú ?t? ú è ?? ú ?D?a ò ??? µ ? · ?? §
µ ú è y? ú ? ÷ 1? ò ??? ó ?? í 1? ò ?????1??
µ
µ ú ??? ú × ?D? ò ???2? µ ? · ? ± ?
µ ú ??? ú ò ? à ?? ò µ ? ò ? × ??D
µ ú á ù ? ú ò ? × ??D ó ?? é ? § ?D??
??o ó ???? ó ? ì ??? ì a
µ ú è y?? ì y??? µ í 3?? ò ??? µ ? ê ? ± e
µ ú ò ?? ú ò ????D?a? ú à í
µ ú ?t? ú í a? ú µ à 12? ù ó ? µ è ? ì ? ú ??
µ ú è y? ú ò ??? ± ?? ¯ ?? ò ????D?? µ ? ó ° ?
ì
µ ú ??? ú ò ? à ? µ ? é ù ?? · ?? §
µ ú ??? ú ò ? à ??D µ ?? ° ? ú ± ?D § ó |? ±
??o ó ???? ó ? ì ??? ì a
µ ú ???? ì y??? µ í 3?? ò ? é ? µ ? ê ? ± e
µ ú ò ?? ú ? ¨ ò ?? ° ? à ?? ì ?? µ
µ ú ?t? ú ì y??? µ í 3?? ò ? é ? µ ??D?a? ú à
í
µ ú è y? ú ó ° ? ì ò ? é ??D µ ?? í 1? ò ò ??
µ ú ??? ú ó ° ? ì ò ? é ??D µ ?? ÷ 1? ò ò ??
µ ú ??? ú è ?? ú ? ú ò ? é ? ê ? ± e é ? µ ?? ° ì ? ò
ì 1|? ü ? ±
??o ó ???? ó ? ì ??? ì a
µ ú ???? ò ?3 ¤ ê ? ± e? ¢ · ???D?? ° D-o í ?D?

ê ì a
µ ú ò??ú ì y????ò?3¤ µ?ê?±e
µ ú?t?ú ò?à?ê±??µ?é ì??D?
µ ú è y?ú ò?à?ì y???Dµ?·???D????ó
µ ú???ú ??ò?
µ ú???ú ó?D-o í?DóD1?µ?à í??
??oó????ó?ì???ì a
µ ú á ù?? ò?à?é ù µ???à í?ù ′?
µ ú ò??ú ???¯
µ ú?t?ú 12??
µ ú è y?ú ?é?ê
µ ú???ú é ù2¨ ó?2¨3¤
µ ú???ú é ù2¨ ′?2¥ µ??ù±?D??ê
µ ú á ù?ú ×¤2¨ ó??à??à?D§ ó|
??oó????ó?ì???ì a
µ ú???? ò?à?é ù µ??ù ′??aê?
µ ú ò??ú ò?à?é ù µ??¨ ò?
µ ú?t?ú ′?ò?ó??′o?ò?
µ ú è y?ú ?ù ò?ó?·oò?
µ ú???ú ·oò?áDó??µ?×
µ ú???ú à?ò?ó???ò?
??oó????ó?ì???ì a
µ ú °??? ò?à?é ù?§2aá?
µ ú ò??ú ò?à?é ù?§2aá?µ?×÷ó?
µ ú?t?ú ò?à?é ù?§2aá?µ?à ú ê ·
µ ú è y?ú ò?à?é ù?§2aá?????
µ ú???ú ?÷1??à??
µ ú???ú 3£ ó?2aá?é è±?
µ ú á ù?ú ò?à?é ù?§2aá?Dè òa×¢ òaµ??
ê ì a
??oó????ó?ì???ì a
µ ú???? à??÷é ù?§113é ó?à??÷??á?
µ ú ò??ú à??÷µ?é ù?§113é
µ ú?t?ú à??÷µ?·?à à
µ ú è y?ú à??÷??á?1??é
µ ú???ú ?ò1ú??×?à??÷µ???á??ò??
µ ú???ú ??×?à??÷??á??D′??ú µ??ê ì
a
??oó????ó?ì???ì a

µ ú ê??? 1ü à??÷é ù?§ ì??÷
µ ú ò??ú 1ü à??÷·¢ò??-à í??ê?
µ ú?t?ú 1ü?úD£?y
µ ú èy?ú ±?àaò?1ü à??÷
µ ú???ú ?é1ü à??÷
µ ú???ú ′?1ü à??÷
µ ú á ù?ú ????3£??1ü à??÷µ??µ?×ì??
÷
??oó????ó?ì???ìa
µ ú ê?ò??? ?ò à??÷é ù?§ ì??÷
µ ú ò??ú ?ò à??÷·¢ò??-à í??ê?
µ ú?t?ú ?ò???¯µ?ò?°?ì?D?
µ ú èy?ú 2á?ò à??÷
µ ú???ú 2|?ò à??÷
µ ú???ú ?÷?ò à??÷
??oó????ó?ì???ìa
µ ú ê??t?? ′ò?÷à??÷é ù?§ ì??÷
µ ú ò??ú ′ò?÷à??÷·¢ò??-à í??ê?
µ ú?t?ú ?¤ì?′ò?÷à??÷
µ ú èy?ú °?ì?′ò?÷à??÷
µ ú???ú °?ì?′ò?÷à??÷
µ ú???ú à à°?ì?′ò?÷à??÷
µ ú á ù?ú ??ò??ó ò?à?D??ü???ì2a
??oó????ó?ì???ìa
µ ú ê?èy?? µ?à??÷é ù?§ ì??÷
µ ú ò??ú µ?à??÷·¢?1??ê?
µ ú?t?ú µ?à??÷·¢é ù?-à í??ê?
µ ú èy?ú MIDIó?MIDIà??÷
µ ú???ú MIDI?ó?ú ó?D??¢?aê í
µ ú???ú ?ò í ¥MIDIò?à???×÷?µ í3
??oó????ó?ì???ìa
µ ú ê????? ?è3aé ù?§?D??
µ ú ò??ú é¤ò?11?ì??ê?
µ ú?t?ú ?è3a·¢é ù ì?D?
µ ú èy?ú ?°?è ê?12??·??±à í??
µ ú???ú ?è3a·?·¨
µ ú???ú ?D?÷3a·¨µ?é ù ò?ì??÷
??oó????ó?ì???ìa
µ ú ê????? ????ò?à?é ù?§

µ ú ò ?? ú ???? ò ? à ? é ù ? § ?D?? µ ?? ê ì a
µ ú ?t? ú ???? ò ? à ? é ù ? § µ ?? ù ± ?????
µ ú è y? ú ò ? à ?? · ?3 µ ??? é ù ó ?????
µ ú ??? ú ò ? à ? ó ?????? · ?3 µ ?? ¥ ??
µ ú ??? ú D?D í ò ? à ??? × ÷ ê ò
µ ú á ù ? ú è ?1 ¤ ò ?D § ó ??? ± è ? · è ? é ù ? µ í
3
?? o ó ???? ó ? ì ??? ì a
????
3 £ ó ? à ?? ÷ ? µ ? ê · ?? § ò ? à à ± í
3 £ ó ? à ?? ÷ µ ? · ?? µ é ù ?1?? ó ?? ¯ ì ? · ?? §
ò ? à à ± í
?? ò ? µ ??? à à
?D?D ò ?2? í ? é ù ??? y è · · ¢ é ù 12?? · ? ê y
?Y
2?????? ×
? ù ° ? o ó ??